

Jan Spranger

Verifizierung einer Mikrobelastrungsvorrichtung mithilfe
eines grauwertkorrelations-basierten Messprinzips

BACHELORARBEIT

HOCHSCHULE MITTWEIDA

UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Fakultät Maschinenbau

Mittweida, 2010

Jan Spranger

Verifizierung einer Mikrobelastrungsvorrichtung mithilfe
eines grauwertkorrelations-basierten Messprinzips

eingereicht als

BACHELORARBEIT

an der

HOCHSCHULE MITTWEIDA

UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Fakultät Maschinenbau

Mittweida, 2010

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Martin Zimmermann

Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Ralf Döring

Vorgelegte Arbeit wurde verteidigt am:

Bibliographische Beschreibung:

Spranger, Jan:

Verifizierung einer Mikrobelastrungsvorrichtung mithilfe eines Grauwertkorrelations basierten Messprinzips. - 2010. - 72 S. Mittweida, Hochschule Mittweida - University of Applied Sciences, Fakultät Maschinenbau, Bachelorarbeit, 2010

Referat:

Ziel der Bachelorarbeit ist es, eine Mikrobelastrungsvorrichtung zu verifizieren. In dem Gebiet der visuellen Kontrolle eines Belastungsversuches, mit Weggenauigkeiten unter einem μm , ist eine exakte Weg- und Geschwindigkeitssteuerung von höchster Bedeutung.

Die Belastung von kleinsten, empfindlichen Proben erfordert eine hohe Steifigkeit der wichtigsten Bauteile. Spiele in Verbindungen müssen so gering wie möglich sein. Unbeabsichtigte Belastungen auf die Probe durch Verformung der Vorrichtungen müssen auf einen Minimum gehalten werden.

Unter Berücksichtigung dieser Vorgaben wurden Tests vorgenommen, die den praktischen Einsatz der Mikrobelastrungsvorrichtung charakterisieren. Weiterhin werden einzelne Bauteile näher untersucht und Lösungsvorschläge für deren Verbesserung angegeben.

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt meinen Betreuern Herrn Prof. Dr.-Ing. Martin Zimmermann und Herrn Dipl.-Ing. Ralf Döring, die mich in der Durchführung der Arbeiten fachkundig betreuten.

Weiterhin danke ich den Mitarbeitern der Chemnitzer Werkstoffmechanik GmbH Bettina Seiler, Jens Hammacher, Kerstin Kreyßig, Elke Noack und Lutz Scheiter, die mich mit ihrem Wissen und ihrer engen Zusammenarbeit bei meiner Arbeit sehr unterstützten.

Ein großes Dankeschön gilt natürlich auch allen Korrekturlesern.

Inhaltsverzeichnis

1 Vorstellung des Unternehmens.....	1
2 Zweck und derzeitiger Stand der Mikrobelastrungsvorrichtung.....	2
2.1 Anforderungen.....	2
3 Aufbau der Mikrobelastrungsvorrichtung.....	3
3.1 Beschreibung der Schnittstellen.....	4
3.1.1 Modul Belastungsvorrichtung.....	5
3.1.2 Modul Steuerung und Regelung (Meß- und Regeleinheit).....	8
3.1.3 Modul Steuersoftware.....	9
4 Beschreibung des Messverfahrens.....	11
4.1 Kurze Einführung in die Grundlagen der digitalen Bildkorrelation.....	11
4.2 Messaufbau	15
4.3 Korrelationsparameter.....	15
5 Verifizierung der Soll-Anforderungen im praktischen Einsatz.....	16
5.1 Grundlegende Eigenschaften.....	16
5.2 Betrachtung der Verfahrenwege und Geschwindigkeiten.....	23
5.3 Betrachtung der Spannvorrichtung.....	33
5.4 Betrachtung Weg Antriebssystem / Messsystem / VEDDAC.....	56
5.5 Betrachtung der Lager / Lagergehäuse	59
5.6 Betrachtung Rahmen / Bodenplatte.....	66
5.7 Aufnahme Kennlinie Wegmesssystem.....	70
5.8 Änderungsvorschläge zur Bediensoftware.....	73
6 Ergebnisse der Untersuchungen	74
7 Vorschlag für Spannvorrichtung	75
7.1 Spannvorrichtung mit Führungsbolzen.....	75
7.1.1 Berechnung der Spannkräfte.....	76
7.1.2 Vorauslegung der Schraubenverbindung.....	78
7.1.3 Anziehdrehmoment	80
7.1.4 Beanspruchung der Schraube beim Anziehen	81
8 Zusammenfassung	84
Anhang	85
Literaturverzeichnis.....	86

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schema über Modulaufbau, Bildquelle [3].....	3
Abbildung 2: Modul Belastungsvorrichtung.....	5
Abbildung 3: Schrittmotor und Riementrieb.....	6
Abbildung 4: Bezeichnung der Spanneinrichtung.....	7
Abbildung 5: Schema Modul Steuersoftware, Bildquelle [3].....	9
Abbildung 6: 2D-Kreuzkorrelationsanalyse1 an lokalen Bildbereichen in der Umgebung virtueller, nutzerdefinierter Messpunkte.....	12
Abbildung 7: Diskretes Feld von Korrelationskoeffizienten für ein Referenzquadrat2.....	13
Abbildung 8: Jochabstand zum jeweiligen Lager.....	18
Abbildung 9: Darstellung der Gleichlaufgenauigkeit des linken und rechten Jochs ..	20
Abbildung 10: Darstellung der Geschwindigkeiten des linken und rechten Jochs.....	21
Abbildung 11: Darstellung zur theoretischen Ermittlung des Umkehrspiels	21
Abbildung 12: Kraft-Weg-Diagramm zur Ermittlung des Umkehrspiels.....	22
Abbildung 13: Kraft-Zeit-Diagramm zur Ermittlung des Umkehrspiels.....	23
Abbildung 14: Messbild und Messfeld zur Auswertung durch VEDDAC.....	24
Abbildung 15: Weg-Zeit-Diagramm zur Betrachtung des Fahrweges des rechten Spannelements in x - Richtung	24
Abbildung 16: Weg-Zeit-Diagramm zur Betrachtung des Fahrweges des linken Spannelements in x - Richtung.....	25
Abbildung 17: Weg-Zeit-Geschwindigkeit-Diagramm des linken Spannelements in x - Richtung.....	27
Abbildung 18: Weg-Zeit-, Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm des linken Spannelements in y-Richtung.....	28
Abbildung 19: Wegänderung über Fahrweg in x-Richtung, Geschwindigkeit über Fahrweg in x-Richtung	29
Abbildung 20: Messfeld mit Sprüngen	30
Abbildung 21: Bewegung in y-Richtung über Fahrweg x-Richtung, Bildaufnahme mit 25 mm Objektiv.....	31
Abbildung 22: Bewegung in y-Richtung über Fahrweg x-Richtung, Bildaufnahme mit 8,5 mm Objektiv.....	31
Abbildung 23: Messfeld auf Grauwertmuster.....	32

Abbildung 24: Vergleich Sprünge vorher und nachher	33
Abbildung 25: Aufbau der Spannvorrichtung.....	34
Abbildung 26: Darstellung des Austretens der Probe aus der Spannvorrichtung.....	35
Abbildung 27: Darstellung der schiefen Einspannung.....	36
Abbildung 28: Messbild VEDDAC 200N Zug.....	38
Abbildung 29: Weg-Zeit-Diagramm des linken Spannelements, 200 N Zug.....	39
Abbildung 30: Messbild VEDDAC 200N Druck.....	39
Abbildung 31: Weg-Zeit-Diagramm des linken Spannelements 200N Druck	40
Abbildung 32: Skizze zur Kraftachse.....	41
Abbildung 33: Zugversuch 200 N großes Messfeld.....	42
Abbildung 34: Druckversuch 200 N großes Messfeld.....	43
Abbildung 35: Darstellung des Verschiebens der Schwalbenschwanzführung.....	43
Abbildung 36: Verfahrensweg linkes und rechtes Spannelement, Zugversuch 300N.....	45
Abbildung 37: Verfahrensweg linkes und rechtes Spannelement, Druckversuch 300N.....	45
Abbildung 38: Schema über mögliche Verschiebung der Spannvorrichtung.....	46
Abbildung 39: Darstellung des Mittelpunktes der Kraftachse.....	48
Abbildung 40: Backen nur senkrecht miteinander verbunden.....	50
Abbildung 41: Versuch Probe in Kraftachse fahren lassen, Backen an Deckel verschraubt.....	50
Abbildung 42: Versuch Kraftachse markiert und Probe sehr genau eingespannt, Backen mit Deckel verschraubt.....	51
Abbildung 43: Kraftabfall	52
Abbildung 44: linke untere Lagerbuchse.....	56
Abbildung 45: Lagerverschiebung durch stetige Krafterhöhung.....	57
Abbildung 46: Lagerverschiebung Zugversuch.....	58
Abbildung 47: Lagerverschiebung Druckversuch.....	58
Abbildung 48: Biegung der Bodenplatte.....	60
Abbildung 49: Aufwölbung der Bodenplatte während Zugversuch, kurze Seite.....	61
Abbildung 50: Durchbiegung der Bodenplatte während Zugversuch, lange Seite.....	61

Abbildung 51: Spannung-Weg-Diagramm zur Aufnahme der Wegkennlinie.....	62
Abbildung 52: Prozentuale Abweichung der Messwerte des Wegmesssystems.....	64
Abbildung 53: Oszillograph.....	65
Abbildung 54: Vorschlag für Spannvorrichtung.....	68
Abbildung 55: Skizze senkrechte Spannkraft.....	69
Abbildung 56: geschlossenes Krafteck.....	69
Abbildung 57: Wirkende Kräfte und Momente an der Spannbacke.....	69

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wegauswertung durch VEDDAC.....	23
Tabelle 2: Geschwindigkeitsauswertung durch VEDDAC.....	23
Tabelle 3: Übersicht der verschiedenen Wege.....	44
Tabelle 4: Übersicht der verschiedenen Wege mit Messuhr.....	46

Formelverzeichnis

A_S	mm^2	Spannungsquerschnitt
A_p	mm^2	Fläche der Mutterauflage
d	mm	Durchmesser
d_2	mm	Flankendurchmesser des Gewindes
d_3	mm	Kerndurchmesser
d_K	mm	Reibungsdurchmesser
E	N/mm^2	E-Modul
F_B	N	Bolzenkraft
F_{Be}	N	Betriebskraft
F_{KL}	N	Klemmkraft
F_N	N	Spannkraft
F_R	N	Zugkraft
F_{VM}	N	Montagevorspannkraft
f_z	mm	Setzbetrag
l_k	mm	Klemmlänge
M_A	Nm	Anziehdrehmoment
M_G	Nm	Gewindemoment
P	mm	Gewindesteigung
p	N/mm^2	Flächenpressung
p_G	N/mm^2	Grenzflächenpressung
$R_{p0,2}$	N/mm^2	0,2 % - Dehngrenze des Schraubenwerkstoffes
s	mm	Weg
t	s	Zeit
v	mm/s	Geschwindigkeit
W_t	mm^3	korrigierte Widerstandsmoment
α	$^\circ$	Winkel
β		Nachgiebigkeitsfaktor für Schaftschrauben
κ		Reduktionsfaktor
μ		Reibwert
μ_G		Reibungszahl im Gewinde

μ_k			Reibungszahl Auflagefläche
ρ'	°		Reibungswinkel
σ_{red}	N/mm ²		Vergleichsspannung
σ_M	N/mm ²		Montagezugspannung
τ_t	N/mm ²		Torsionsspannung
φ	°		Steigungswinkel

1 Vorstellung des Unternehmens

Die Chemnitzer Werkstoffmechanik GmbH ist als Dienstleister für Forschungs- und Entwicklungsleistungen auf dem Gebiet der Werkstoffmechanik tätig. Die Arbeitsgebiete liegen in der

- Werkstoffprüfung, Werkstoffanalytik, Bauteilpräparation,
- Schwingungsmesstechnik,
- FEM-Simulationen,
- Deformationsanalyse und korrelationsgestützte Bildverarbeitungstechnologien.

Ein wichtiges Gebiet ist dabei die Analyse von thermo-mechanischen Eigenschaften und die Zuverlässigkeit von Mikro- und Nanosystemen. Die Tätigkeiten umfassen unter anderem Mikrodeformations- und Schwingungsanalysen, die Bestimmung von Materialparametern und die Verifizierung von Materialgesetzen.

2 Zweck und derzeitiger Stand der Mikrobelastrungsvorrichtung

Der Zweck der Mikrobelastrungsvorrichtung besteht in der Ermittlung bruchmechanischer Parameter von Werkstoffen und Werkstoffverbunden in hochauflösenden Rasterelektronenmikroskopen. Diese Werkstoffkennwerte sollen durch Zug- und Druckbelastungen bis zu 500 N ermittelt werden. Eine thermische Belastung bis zu einer Umgebungstemperatur von 200°C kann durchgeführt werden. Die Zustellwege der Vorrichtung liegen im Mikrometerbereich. Der Einsatz in Rasterelektronenmikroskopen setzt die Vakuumtauglichkeit der Vorrichtung voraus. Des Weiteren ist eine adaptive Messfeldnachführung durch Grauwertkorrelation möglich. Dadurch können Bildausschnitte, die während eines Zugversuches aus dem betrachteten Bereich wandern würden, im Blickfeld des Bilderfassungsgerätes gehalten werden.

2.1 Anforderungen

Die verschiedenen Einsatzgebiete wie das Focus Ion Beam (FIB), Rasterelektronenmikroskop (ELMI), Laserscanning Mikroskop (LSM) oder normale Lichtmikroskope und makroskopische Aufnahmegeräte erfordern unterschiedliche Anforderungen an die Belastungsvorrichtung. Die Vorrichtung muss sowohl unter Hochvakuum (FIB, ELMI) als auch unter normaler Atmosphäre (LSM) arbeiten. Die maximale Größe der Vorrichtung ist auf den Einsatz im FIB ausgelegt. Sie ist nicht nur vom Innenraum abhängig, sondern auch von den enthaltenden Sensoren, Aktoren u.ä. die während des Einsatzes nicht beschädigt werden dürfen. Das Gewicht der Vorrichtung darf maximal 3 kg betragen. Aufgrund des Messprinzips der Mikroskope ist die Probenposition so zu wählen, dass sie mittig und möglichst weit oben liegt. Die Vorrichtung ist auf Standard Zug- und Biegeproben ausgelegt. Elektromagnetische Einflüsse müssen aufgrund der Messverfahren an der Probe vermieden werden. Da eine Bildaufnahme der genannten Mikroskope bis zu 1,5 min dauern kann, muss bei einer thermischen Belastung die Temperatur möglichst konstant gehalten werden. [3]

3 Aufbau der Mikrobelastrungsvorrichtung

Um eine ausreichende Flexibilität der Vorrichtung zu gewährleisten wurde eine Modulbauweise gewählt (Abb. 1). Dieser modulare Aufbau garantiert einen flexiblen Einsatz durch schnelle und kostengünstige Anpassung an verschiedene Einsatzmöglichkeiten.

Die Mikrobelastrungsvorrichtung besteht aus drei Hauptmodulen:

- die Belastrungsvorrichtung mit Antrieb, Spanneinrichtung, Aktorik und Sensorik
- die Mess- und Regeleinheit zur Aufnahme der Kraft-, Weg- und Temperaturinformation und zur Steuerung der Belastrungsvorrichtung
- der Steuerrechner mit Steuersoftware und Benutzeroberfläche, als Schnittstelle zum Bediener.

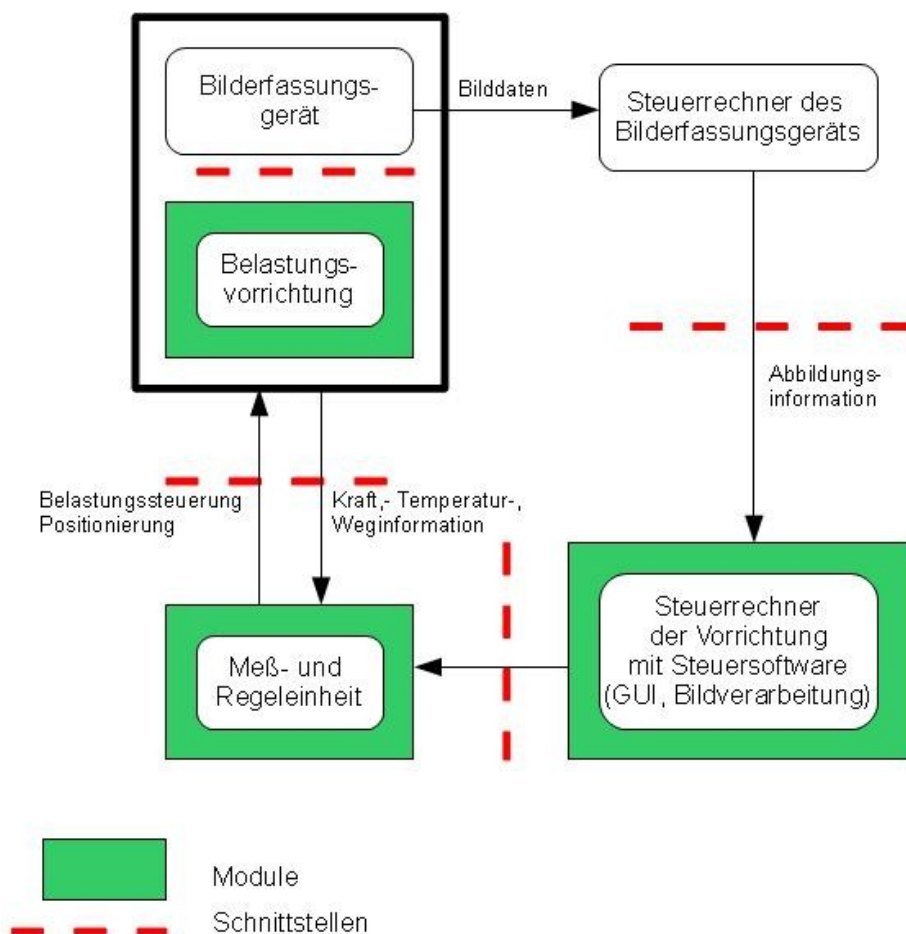


Abbildung 1: Schema über Modul Aufbau, Bildquelle [3]

3.1 Beschreibung der Schnittstellen

–Schnittstelle Bilderfassungsgerät ↔ Belastungsvorrichtung

Sie muss gewährleisten, dass die elektrischen Zuleitungen der Belastungsvorrichtung, vom Bilderfassungsgerät (z.B. Mikroskop mit Vakuumkammer) zum Steuerrechner der Vorrichtung geführt werden können.

–Schnittstelle Steuerrechner Bilderfassungsgerät ↔ Steuerrechner Vorrichtung

Hier erfolgt der Bildtransfer der vom Bilderfassungsgerät aufgenommenen und generierten Bilder. Aus diesen Bildern gewinnt die Belastungsvorrichtung die Informationen, die notwendig für die Messfeldnachführung sind.

–Schnittstelle Steuerrechner Vorrichtung ↔ Mess- und Regeleinheit

An erster Stelle ist die Kommunikation der Mess- und Regelsoftware mit der Steuerungssoftware zu betrachten, als die elektrische Kontaktierung der beiden Geräte. Während die Mess- und Regeltechnik im Hintergrund arbeitet, stellt die Steuerungssoftware die Verbindung zum Bediener dar, der mit geeigneten Anwendertools arbeiten kann.

–Schnittstelle Mess- und Regeleinheit ↔ Belastungsvorrichtung

Es erfolgt die Steuerung der Vorrichtung in Hinsicht auf Belastung (mechanisch und / oder thermisch), Verfahrensweg und der Messfeldnachführung. Gleichzeitig werden Weg-, Kraft- und Temperaturinformationen aufgenommen. [3]

3.1.1 Modul Belastungsvorrichtung

Das Modul Belastungsvorrichtung besteht aus dem Rahmen, der Antriebseinheit, den Spannelementen, der Heizeinrichtung sowie der Sensorik.

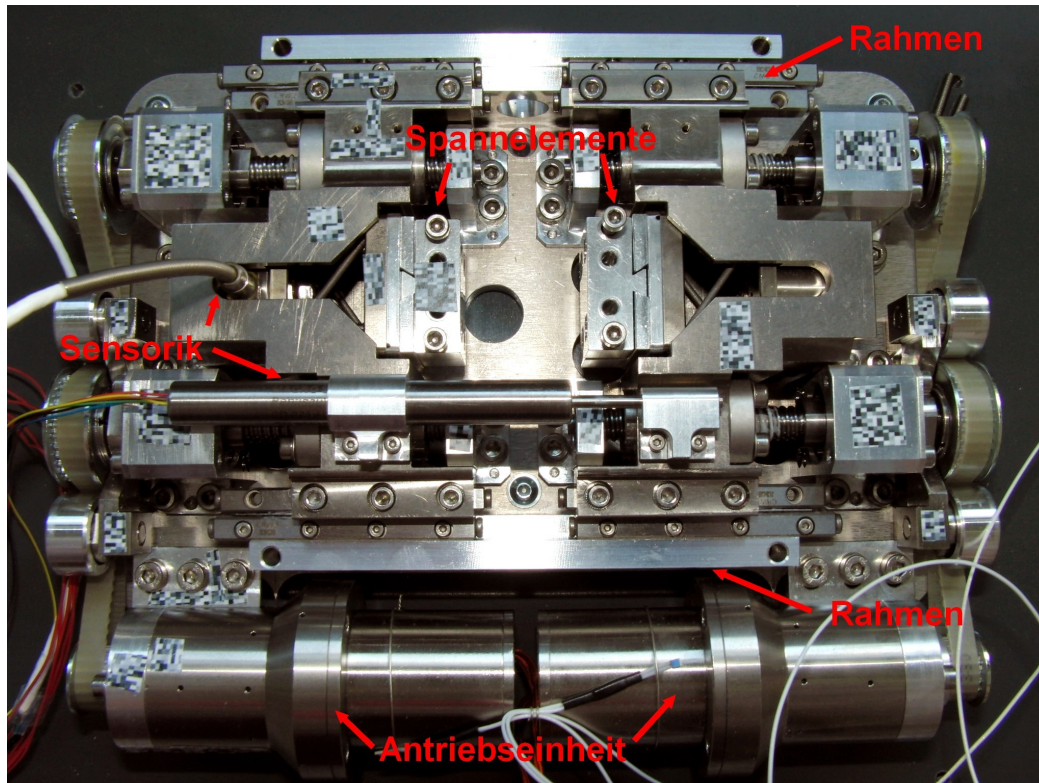


Abbildung 2: Modul Belastungsvorrichtung

Im folgenden werden diese einzelnen Bestandteile näher erläutert.

Rahmen

Der Rahmen besteht aus einer Grundplatte auf der zwei Seitenteile montiert sind. Die Seitenteile sind mit Führungselementen kraftschlüssig verbunden. Auf der Grundplatte befinden sich weiterhin die Lager für die vier Spindeln, wobei jeweils zwei Spindeln ein Joch antreiben. Um eine geringe Verformung der Vorrichtung bei thermischer Belastung zu gewährleisten, wurden die Spindeln aus Titan und die Grundplatte, aus Gewichts- und Kostengründen, aus hochfesten Aluminium gefertigt. Weiterhin dient die Grundplatte als Adapter für verschiedene Mikroskope die zum Einsatz vorgesehen sind.

Antriebseinheit

Der Antrieb der Spindeln erfolgt über die Kopplung eines Schrittmotors mit einem Getriebe in Verbindung mit einem Zahnriemen. Die geforderte Zustellgenauigkeit der Vorrichtung wurde mit der Verbindung der Schrittmotoren und dem Getriebe mit einer enormen Untersezung von 1:100 realisiert.

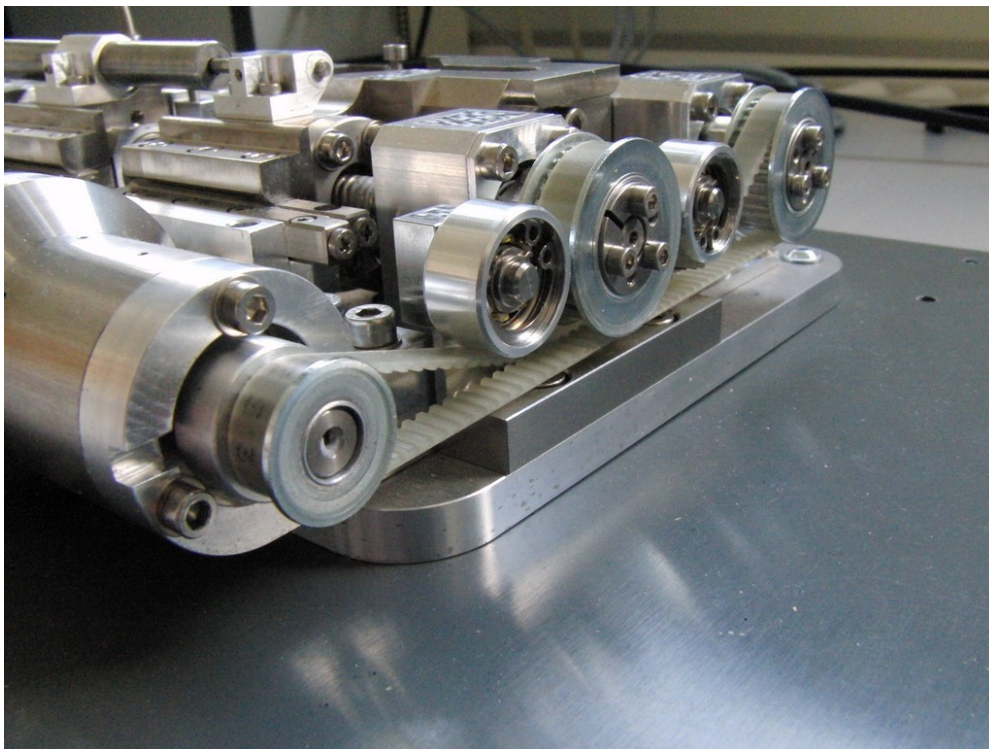


Abbildung 3: Schrittmotor und Riementrieb

Spannelemente und Heizeinrichtung

Die Spannelemente und die Heizeinrichtung stehen im engen Zusammenhang zueinander. Am Joch ist der thermische Isolator befestigt, gefolgt von der Heizeinrichtung woran die Spannelemente angebracht sind. Die Aufgaben des thermischen Isolators sind einerseits die Belastrungsvorrichtung vor der thermischen Belastung der Heizplatte zu isolieren und anderseits den mechanischen Zug- und Druckbelastungen standzuhalten. Im Boden des Heizmoduls befindet sich ein Heizdraht der mäanderförmig eingeklemmt ist. Derzeitig wurde der Heizdraht wegen Veränderungen am Anschlussstecker ausgebaut. Der Deckel ist mit einer Schwalbenschwanzführung ausgestattet um verschiedene Spannelemente einfach und schnell auszutauschen und um verschiedene Proben bzw. Belastungsmodi (Zug/ Druck, 3-, 4-Punktbiegung) zu verwenden bzw. zu fahren.

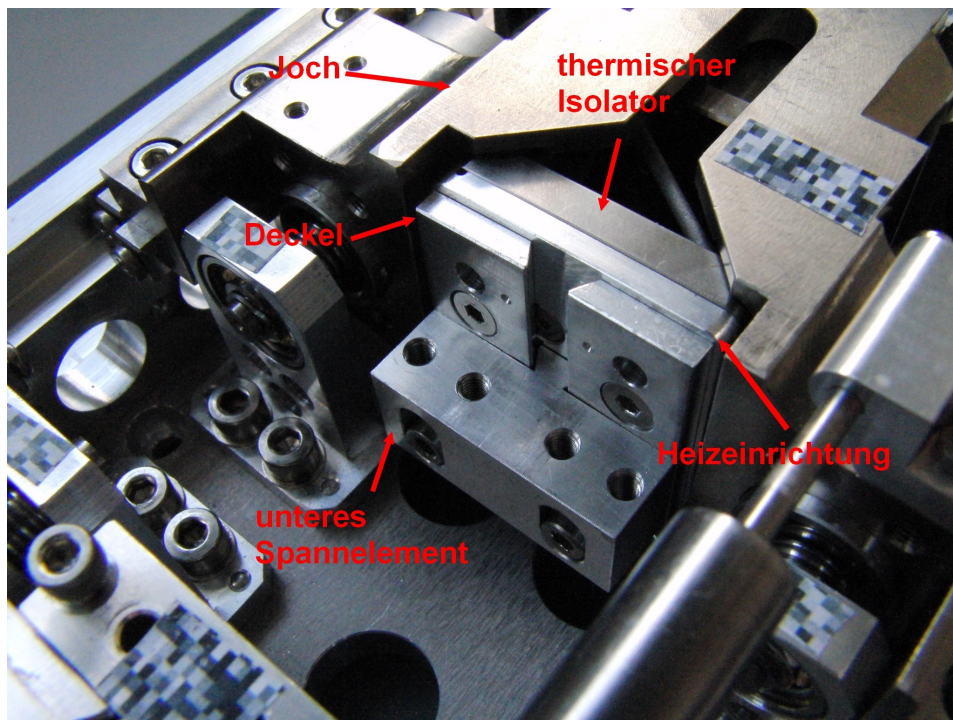


Abbildung 4: Bezeichnung der Spanneinrichtung

Sensorik

Die Aufgabe der Sensorik ist die Ermittlung der Kraft-, Weg- und Temperaturinformationen.

Die Kraftmessung erfolgt durch eine Miniaturkraftmessdose mit einem Messbereich für Zug- und Druckkräfte von 500 N.

Zur Wegmessung wurde ein vakuumtaugliches, induktives Wegmesssystem nach dem LVDT-Prinzip (Linear variablem Differential Transformator) verwendet.

Die Temperaturmessung erfolgt über PT100-Temperaturmessfühler, die flexibel befestigt werden können.

3.1.2 Modul Steuerung und Regelung (Mess- und Regeleinheit)

Die Aufgabe des Steuer- und Regelmoduls besteht in der Ansteuerung der Aktoren und Sensoren der Vorrichtung, sowie die Sicherstellung der Kommunikation mit dem Steuerrechner. Um die Flexibilität der gesamten Vorrichtung zu gewährleisten, wurde auch hier ein modularer Aufbau gewählt. Dies beinhaltet den inneren Aufbau sowie die Kommunikation nach Außen.

Der Elektronikaufbau des Steuer- und Regelmoduls gliedert sich wiederum in weitere Untermodule:

- Stromversorgungsmodul mit Leitrechner
- zwei Heizmodule
- Schrittmotormodul
- Sensormodul

Im folgenden werden deren Aufbau und Aufgabe kurz erläutert.

Stromversorgungsmodul mit Leitrechner

Das Stromversorgungsmodul dient zur Bereitstellung der Hauptspannungsversorgung für das Gesamtmodul und trägt gleichzeitig den Leitrechner. Der Leitrechner steuert die Zusammenarbeit der anderen Module und hält die Verbindung zum Steuerrechner.

Heizungsmodule

Das Prinzip der Heizung basiert auf der Wärmeleitung zwischen Heizbacken, Spannvorrichtung und Probe. Es entsteht also immer ein erheblicher Temperaturgradient zwischen Heizbacken und Probe. Beide Heizer werden über einen Mikrocontroller digital gesteuert. Dies erlaubt sowohl eine Steuerung der Heizkanäle über den PC als auch den Aufbau von Regelungsstrecken direkt im Steuergerät. Die Controller wurden so ausgelegt, dass auch komplexere Regelungsalgorithmen integriert werden können.

Schrittmotormodul

Das Schrittmotormodul ist genau abgestimmt auf die verwendeten Schrittmotoren. Eine Steuerung mit Mikroschrittfähigkeit ist aufgrund der hohen Untersetzung der Vorrichtung nicht notwendig. Um Störungen bei sensiblen Messungen zu vermeiden, kann die Stromversorgung der Schrittmotoren abgeschaltet werden.

Sensormodul

Das Sensormodul lässt die Messung von Kraft, Weg und Temperatur zu. Der Einsatz von Kraft- und Wegmesssensoren mit integrierter Elektronik ist nicht realisierbar, da die beengten Platzverhältnisse, die thermische Belastung und der Vakuumeinsatz dagegen sprechen. Im Sensormodul ist daher die komplette Elektronik integriert. [3]

3.1.3 Modul Steuersoftware

Aufgabe der Software ist es, unter einer einheitlichen bedienerfreundlichen Benutzeroberfläche, die Zusammenarbeit zwischen Bilderfassungsgerät, Mess- und Regeleinheit sowie einer Bildverarbeitungssoftware zu gewährleisten.

Das Softwarepaket ist wiederum in mehrere Module aufgeteilt.

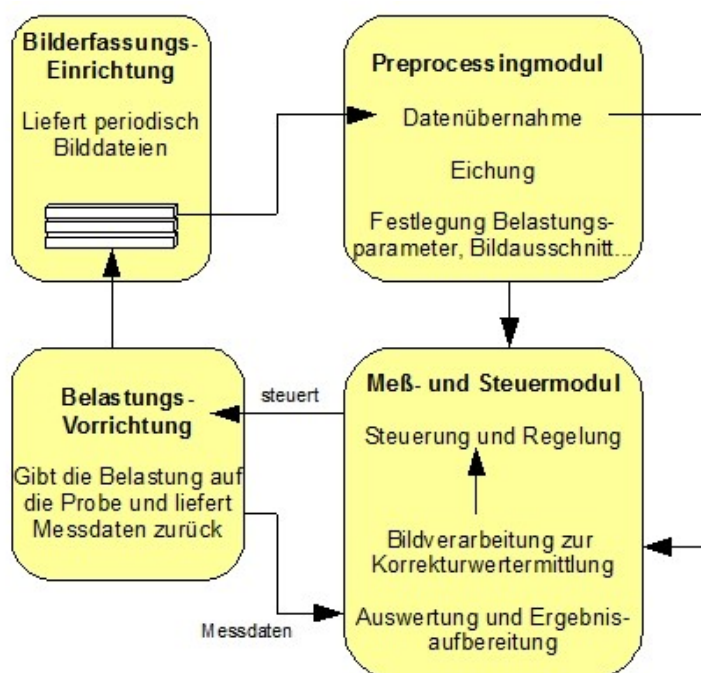


Abbildung 5: Schema Modul Steuersoftware, Bildquelle [3]

Die Bilderfassungseinrichtung liefert in periodischen Abständen Bilddateien, die bei der Datenübernahme in eine normierte Form konvertiert werden. Diese Bilder sind durch die Bildverarbeitungssoftware die Grundlage für die Eichung und für die Nachführung des Bildbereiches während des Versuches. Die Steuerung und Regelung des Mess- und Steuermoduls übernimmt unter der Verwendung der Ergebnisse aus Eichung, Belastungsparameter und Korrekturwertermittlung die eigentliche Steuerung der Vorrichtung. Im Mess- und Steuermodul werden die Messergebnisse der Vorrichtung ausgewertet und die Ergebnisse aufbereitet. [3]

4 Beschreibung des Messverfahrens

4.1 Kurze Einführung in die Grundlagen der digitalen Bildkorrelation

Die digitale Kreuzkorrelationsanalyse an Grauwertbildern (digital Image Correlation, DIC) ist eine zerstörungsfreie optische Feldmessmethode, die auf Videobilderfassung und digitaler Bildverarbeitung beruht. Einer der herausragenden Vorteile optischer Feldmessmethoden ist, dass sie ein vollständig zweidimensionales Ergebnisfeld liefern. Bildkorrelationsbasierte zerstörungsfreie Methoden wurden erstmals in den 80er Jahren des 20. Jahrhunderts entwickelt und genutzt.

Die Bildkorrelationsverfahren bieten umfangreiche Möglichkeiten für Applikationen zur berührungslosen und zerstörungsfreien Analyse in den Werkstoffwissenschaften und der Produktionstechnologie. Die Bewertung von Materialverformungen, Strukturen und Komponenten unter thermischen oder mechanischen Lasten, die Detektion struktureller und mikrostruktureller Oberflächenmodifikationen, die Musteranalyse zur Detektion verborgener bzw. gefährdender Objekte sind nur einige von vielen vielschichtigen Anwendungsbereichen.

Voraussetzung für eine Grauwertkorrelation sind wenigstens zwei unterschiedliche Bilder des betrachteten Objektes. Dafür werden meist Standardvideokameras oder Video-Digitalisierer (frame grabber) genutzt. Die vorhandenen Bilder werden mittels eines speziellen zweidimensionalen Kreuzkorrelations-Algorithmus verglichen, der auf lokale Bildausschnitte in der Umgebung definierter Messpunkte angewendet wird. Das erste Bild dient dazu als Referenzzustand für die nachfolgenden Bilder. [4]

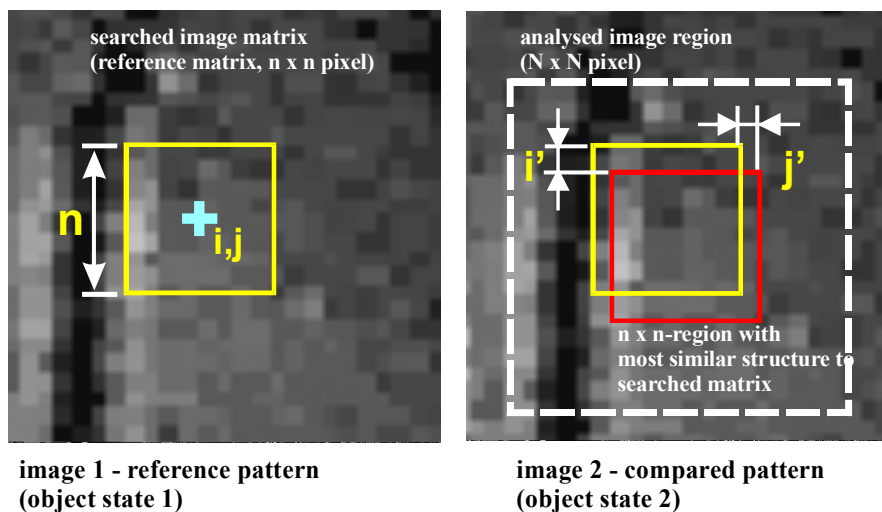


Abbildung 6: 2D-Kreuzkorrelationsanalyse¹ an lokalen Bildbereichen in der Umgebung virtueller, nutzerdefinierter Messpunkte

Um eine Relativverschiebung der jeweiligen Messpunkte im Referenzbild zu bestimmen, ist derjenige Bereich im Messbild zu finden der diesem am ähnlichsten ist. Als Maß für die Ähnlichkeit der Bereiche wird der Korrelationskoeffizient K genutzt. Trotz hohen Rechenaufwand ist dieser wegen seiner hohen Robustheit gegenüber Störungen bestens geeignet. K wird nun für alle möglichen Lagen der Referenzmatrix in der Suchumgebung ermittelt. K ist laut Formel (1):

¹ 2D-Kreuzkorrelationsanalyse an lokalen Bildbereichen in der Umgebung virtueller, nutzerdefinierter Messpunkte. Die Parameter Seitenlänge n der Referenzmatrix im Referenzbild und Seitenlänge N der Suchumgebungsmatrix im zweiten Bild können in VEDDAC vom Bediener (in den Sequenzeigenschaften) vorgewählt werden. Es ist offensichtlich, dass N stets größer als n sein muss. Auch ist ersichtlich, dass keine Verschiebungen i und j gemessen werden können, die größer als die halbe Differenz zwischen N und n sind, so dass die Suchumgebung hinreichend groß gewählt werden muss. Durch die Größe der Referenzmatrix ergibt sich eine gewisse laterale Unschärfe der Verschiebungsbewertung, da die Information aus einem Bildbereich einer gewissen Ausdehnung $n \times n$ entnommen wird. Kleine Referenzmatrizen bieten eine bessere laterale Auflösung, führen aber wegen der wenig enthaltenen Ortsinformation schnell zu Fehlauswertungen. Hier hat der Bediener (z.B. durch Ausprobieren) einen Kompromiss zwischen Auflösung und Fehlerfreiheit der Ergebnisfelder zu finden.

$$K_{i',j'} = \frac{\sum_{i=i_0}^{i_0+n-1} \sum_{j=j_0}^{j_0+n-1} (I_1(i,j) - M_{I_1}) (I_2(i+i',j+j') - M_{I_2})}{\sqrt{\sum_{i=i_0}^{i_0+n-1} \sum_{j=j_0}^{j_0+n-1} (I_1(i,j) - M_{I_1})^2 \sum_{i=i_0}^{i_0+n-1} \sum_{j=j_0}^{j_0+n-1} (I_2(i+i',j+j') - M_{I_2})^2}} \quad (1)$$

$I_{1,2}$ und $M_{1,2}$ sind die Intensitäts- oder Grauwerte des Pixels (i,j) im Referenzbild 1 und Vergleichsbild 2 sowie die Grauwertmittelwerte über die Matrizen der Referenzfeldgröße. i' und j' indizieren den ganzzahligen Teil der Verschiebung der Referenzmatrix in der analysierten Region des Vergleichsbild 2. Quadratische Matrizenformate angenommen, ist ein Feld von $K_{i',j'}$ zu bestimmen für alle möglichen Verschiebungen $(i',j') - (N-n)/2 \leq i',j' \leq (N-n)/2$. [4]

Dieser Algorithmus liefert ein zweidimensionales diskretes Feld von Korrelationskoeffizienten, das nur an ganzzahligen Pixelkoordinaten (i,j) definiert ist. [4]

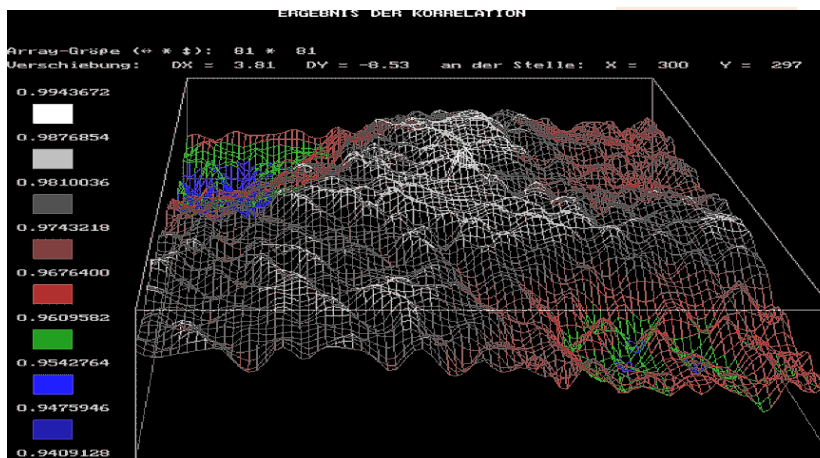


Abbildung 7: Diskretes Feld von Korrelationskoeffizienten für ein Referenzquadrat²

Das diskrete Maximum des Felds wird als diejenige Position interpretiert, zu dem die Referenzmatrix vom Referenz- zum Vergleichsbild hin verschoben wurde.

Die Genauigkeit der Verschiebungsmessung wird durch einen sogenannten

² Diskretes Feld von Korrelationskoeffizienten für ein Referenzquadrat mit $n = 30$ in einer quadratischen Vergleichsumgebung mit $N = 81$. Ein gut sichtbares Maximum liegt bei $(4,-0)$, die Subpixelanalyse liefert das im Bild angegebene nichtganzzahlige Ergebnis. [4]

Subpixelalgorithmus verbessert. Der einfachste erfolgreiche Weg hierzu besteht darin, die diskrete Umgebung des Feldmaximums $K_{\text{max,discrete}}$ durch eine Parabelnäherung durch Maximum und nächste Nachbarn zu interpolieren und das (nichtganzzahlige) Maximum der Parabel aufzusuchen. Möglich (allerdings rechenzeitintensiver) ist auch eine Korrelation in durch Interpolation in ihrer Auflösung verbesserten Bildern. [4]

Als Rechenbeispiel für eine Anwendung des Subpixelalgorithmus kann folgendes angenommen werden. Das diskrete ganzzahlige Maximum liegt bei X_2 (2; 4). Die Nachbarpunkte sind X_1 (1;2) und X_3 (3; 4). Nach dem einsetzen der Punkte in die Normalform einer quadratischen Gleichung $f(x) = ax^2 + bx + c$ entsteht folgendes Gleichungssystem.

$$I \quad a + b + c = 2$$

$$I \ I \quad 4a + 2b + c = 4$$

$$I \ I \ I \quad 9a + 3b + c = 3$$

nach der Lösung des Gleichungssystems (siehe Anhang A) ergibt sich folgende Gleichung

$$f(x) = 1,5x^2 + 6,5x - 3 \quad (2)$$

Durch Differenzieren und Nullsetzen (3) ergibt sich der x-Wert des Maximums.

$$f'(x) = -3x + 6,5$$

$$f'(x) = 0 = -3x + 6,5 \quad (3)$$

$$x = 2,167$$

x-Wert des Maximums einsetzen in (2)

$$f(2,167) = -1,5 \cdot 2,167^2 + 6,5 \cdot 2,167 - 3$$

$$f(2,167) = 4,04$$

Das Maximum M liegt bei (2,167; 4,04). Somit ist nun eine genauere Angabe des Maximums und somit die Lage des verschobenen Felds möglich.

Angewandt auf eine Anzahl von Messpositionen (in VEDDAC auf ein nutzerdefiniertes orthogonales Netz äquidistanter Messpunkte) liefert diese Methode das in-plane-Verschiebungsfeld. Lage, Form und Punktabstand des

Messpunktnetzes werden in VEDDAC mittels eines grafischen Messpunkteditors interaktiv durch den Nutzer festgelegt. Die Ergebnisse können in unterschiedlicher grafischer Repräsentation (VEDDAC: Vektoren, Grid, farbcodierte Darstellung) angezeigt oder auch als numerische Liste für die externe Weiterverarbeitung exportiert werden. [4]

4.2 Messaufbau

Der Messaufbau beinhaltet eine Messvorrichtung aus Profilstangen an denen eine CCD – Kamera (Charge-coupled Device) befestigt ist. War es notwendig die Kamera nicht über, sondern neben der Vorrichtung zu platzieren, wurde ein kleines Stativ verwendet. Es musste darauf geachtet werden, dass die Messbedingung sich während eines Versuches nicht veränderten. Insbesondere die Belichtung der betrachteten Fläche musste konstant sein. Die CCD – Kamera nimmt während des Versuches in gewissen zeitlichen Abstände Grauwertbilder auf. Anhand dieser Bilder kann mit der Korrelationssoftware VEDDAC z.B. Bewegungsverläufe von Bauteilen ermittelt werden. Nachdem in VEDDAC die Bilder ausgewertet wurden, können die Daten exportiert und in einem Tabellenkalkulationsprogramm in einem Diagramm dargestellt werden. Da das Verfahren der Bildkorrelation bei guten Messbedingungen Bewegungen im „Subpixel-Bereich“ messen kann, ist die Anwendung auf die Mikrobelaugungsvorrichtung von großem Nutzen da hier kleinste Bewegungen an der Vorrichtung ermittelt werden können.

4.3 Korrelationsparameter

Hier folgen die eingestellten Korrelationsparameter, die bei den Auswertungen in der Korrelationssoftware VEDDAC genutzt wurden. Die Bildgröße der aufgenommenen Bilder der CCD-Kamera mit einem Objektiv, Brennweite von 25 mm, betrugen 1600 x 1200 Pixel. Die Größe des Referenzfelds betrug 50 Pixel. Das Messfeld wurde je nach zu erwartenden Verschiebungen gewählt. Die meiste Zeit betrug es 60 Pixel. Der Korrelationsalgorithmus war auf vollständige Korrelation und der Subpixelalgorithmus auf Parabolisch eingestellt. Die Messpunkte wurden je nach Versuch unterschiedlich angebracht um bestmögliche Ergebnisse zu erzielen.

5 Verifizierung der Soll-Anforderungen im praktischen Einsatz

5.1 Grundlegende Eigenschaften

Zu Beginn wurde die Vorrichtung auf grundlegende Eigenschaften hin untersucht. Diese sind für die weiteren Versuche für den Nutzer der Vorrichtung von wichtigen Wert, da diese die Grenzen und Richtwerte der Vorrichtung aufweisen. Für den Bediener sind Angaben über Geschwindigkeit, Spannbackenabstand, Auflösung von Weg und Kraft, Gleichlaufgenauigkeit und Umkehrspiel von großer Bedeutung. Ohne diese Kennwerte lassen sich keine Versuche planen oder ordnungsgemäß durchführen.

Für die weiteren Kapitel wird die Vorrichtung so betrachtet, dass die Motoren dem Betrachter zugewandt sind.

Berechnung der Schrittlänge

Da der Antrieb der Vorrichtung durch Schrittmotoren erfolgt, ist es besonders hilfreich zu wissen wie viel Weg an der Vorrichtung zurückgelegt wird wenn ein Schritt im Motor erfolgt. Zum Zeitpunkt der Versuche wurde die Geschwindigkeit der Schrittmotoren in Schritte pro Sekunde angegeben. Für eine bessere Vorstellung von der Größe und auch für die Handhabung für den späteren Einsatz ist eine Angabe in $\mu\text{m/s}$ erforderlich. Aus der Steuersoftware wurden folgende Werte übernommen. Ein Weg von 0,5 mm bei einer Geschwindigkeit von 250 Schritten pro Sekunde. Die Versuchszeit betrug 67,5 s. Mit der Formel zur Geschwindigkeitsberechnung, siehe Formel (4), lässt sich nun die Geschwindigkeit in $\mu\text{m/s}$ bestimmen.

$$v = \frac{s}{t} = \frac{0,5 \text{ mm}}{67,5 \text{ s}} = \frac{0,0074074 \text{ mm}}{\text{s}} = \frac{7,4074 \mu\text{m}}{\text{s}} \quad (4)$$

Die Bestimmung der Schrittlänge ermöglicht es, jede Geschwindigkeit von Schritte/s in $\mu\text{m/s}$ umzurechnen, siehe Formel (5).

$$\frac{7,4074 \mu\text{m} \cdot \text{s}}{250 \text{ Schritte} \cdot \text{s}} = \frac{0,296296 \mu\text{m}}{\text{Schritt}} = \frac{29,629 \text{ nm}}{\text{Schritt}} \quad (5)$$

Der Weg der bei einem Schritt im Motor zurückgelegt wird beträgt somit 29,6 nm.

Die Anzahl der Schritte multipliziert mit dem Wert von einer Schrittlänge ergibt die Geschwindigkeit in $\mu\text{m/s}$ bzw. nm/s .

Minimale Geschwindigkeit

Die minimale Geschwindigkeit der Schrittmotoren beträgt 8 Schritte pro Sekunde. Dies entspricht einer Geschwindigkeit von $0,237 \mu\text{m/s}$.

Maximale Geschwindigkeit

Die maximale Geschwindigkeit der Schrittmotoren beträgt 2000 Schritte pro Sekunde. Diese Geschwindigkeit von $59,258 \mu\text{m/s}$ ist aber nur zu erreichen, wenn der Motor im Halbschrittbetrieb angesteuert wird.

Es wurde jedoch festgestellt, dass es bei dieser Geschwindigkeit dazukommen kann, dass der Motor aus dem „Schritt“ kommt. Dies äußert sich darin, dass der Linearmotor nicht anfährt. Dies bedeutet aber nicht, dass die Geschwindigkeit nicht gefahren werden kann. Wird der Motor langsam angefahren, kann diese Geschwindigkeit auch erreicht werden. Da aber das Bremsen der Motoren auch langsam erfolgen müsste, ist kein genaues und schnelles Anhalten der Motoren möglich. Deshalb wurde die maximale Geschwindigkeit auf 1000 Schritte halbiert, da bis hierhin im Vollschrittmodus gefahren wird und keine Ausfälle der Motoren auftreten können. Die maximale Geschwindigkeit beträgt nun $29,629 \mu\text{m/s}$.

Maximaler Spannbackenabstand

Dieser kann ermittelt werden, indem in der Steuersoftware der Schrittmotoren angegeben wird, dass beide Motoren auf ihre Ausgangsposition fahren. Diese Position ist der Nullpunkt des linearen Messsystems. Er liegt auf der Spindel einige Millimeter vor dem äußeren Lager und dient gleichzeitig als Endschalter. Von diesem Punkt aus bezieht sich das Wegmesssystem der Schrittmotoren.

Er betrug: laut Messdaten vom Antriebssystem: 70,000 mm
laut Messdaten vom Wegmesssystem: 66,092 mm

Ein Nachmessen mit dem Lineal ergab, dass der Abstand zwischen den Deckeln 66 mm betrug. Diese Differenz kommt daher, dass wie schon oben erwähnt, die Motoren aus dem „Schritt“ gekommen sind und der reelle Wert nicht mit dem theoretischen Wert übereinstimmt. Durch eine neue Eichung der Motoren wurde dies behoben und der maximale Backenabstand beträgt nun 69,6 mm.

Minimaler Spannbackenabstand

Bei dem Versuch den Abstand auf sein Minimum zu verkleinern zeigt sich das Problem der verlorenen Eichung stärker auf.

Aufgrund der Länge der Spindeln müssten nun beide Jochs sich um 15 mm in die Mitte bewegen ohne am inneren Lager anzustoßen. Das rechte Joch hingegen war nicht in der Lage diese 15 mm zu verfahren ohne am Lager anzustoßen. Wie in Abbildung 8 gezeigt.

Nach der erneuten Eichung beträgt der minimale Spannbackenabstand 39,6 mm.

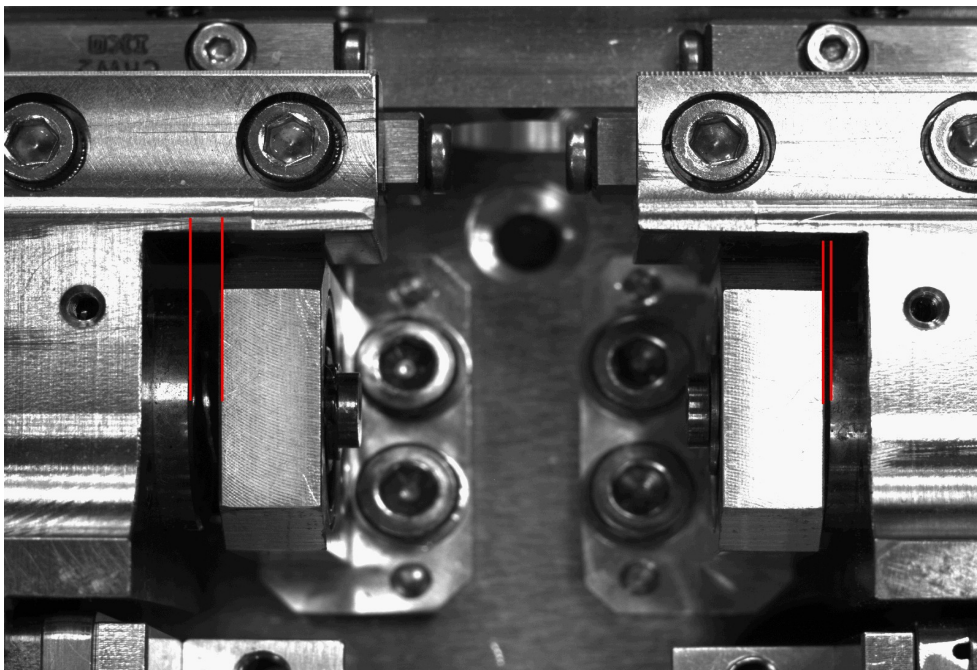


Abbildung 8: Jochabstand zum jeweiligen Lager

Kraftauflösung

Der Kraftbereich der Miniaturkraftmessdose der Firma Burster reicht von -500 N (Zug) bis 500 N (Druck). Laut Hersteller beträgt die Messgenauigkeit $\leq 0,2 \%$ vom Endwert. In diesem Fall beträgt die Auflösung ≤ 1 N. Die Auflösung der Kraft in der Steuersoftware der Vorrichtung beträgt 0,01 N.

Wegauflösung

Die Auflösung des induktiven Wegmesssystem beläuft sich in der Steuersoftware auf 1 μm .

Gleichlaufgenauigkeit

Eine wichtige Vorgabe an die Vorrichtung ist die der Gleichlaufgenauigkeit. Beide Motoren und somit beide Spannelemente müssen die gleichen Bewegungen und Geschwindigkeiten vollführen. Um dies zu ermitteln wurden beide Motoren ohne Last mit einer Geschwindigkeit von 100 Schritten pro Sekunde ($2,96 \mu\text{m/s}$) angesteuert. Der Verfahrweg betrug 100 μm . Im Versuch wurden jeweils die 100 μm nach außen gefahren, einige Sekunden gehalten und dann wieder nach innen gefahren. Es entstand folgendes Weg – Zeit – Diagramm.

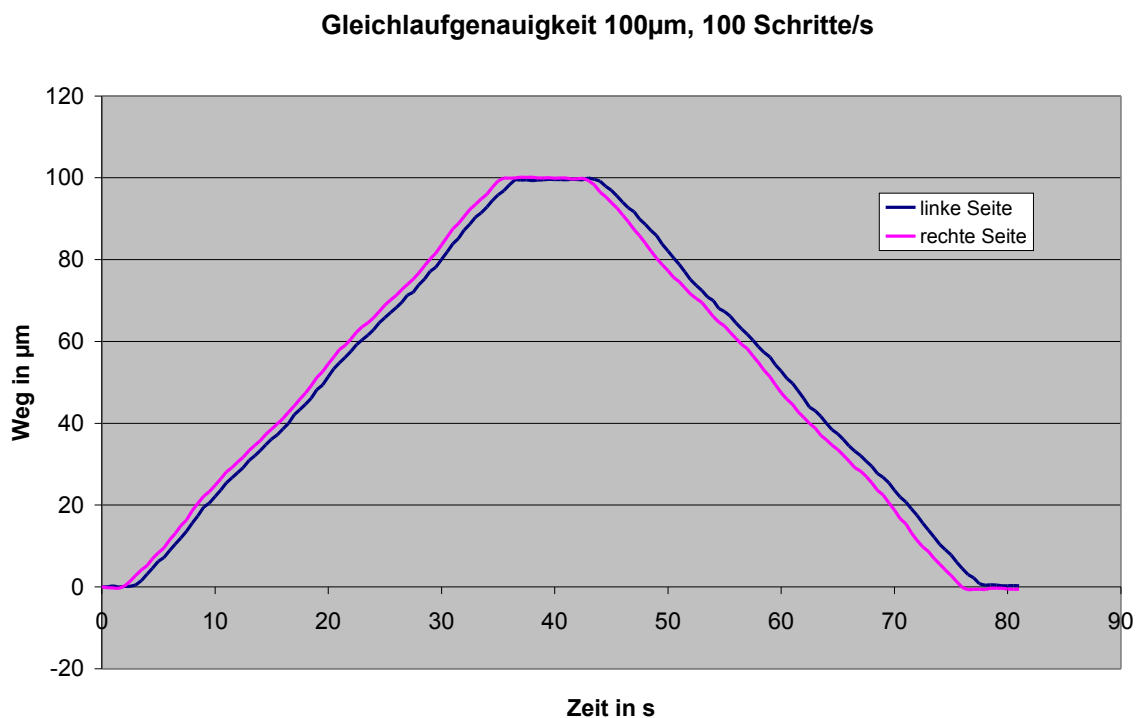


Abbildung 9: Darstellung der Gleichlaufgenauigkeit des linken und rechten Jochs

In Abbildung 9 ist zu erkennen, dass die geforderten 100 μm von beiden Jochs gefahren wurden. Auch die Rückfahrt der Motoren zeigt, dass die Ausgangsposition wieder erreicht wurde. In Abbildung 10 wird die Geschwindigkeit der beiden Jochs dargestellt. Die geforderte Geschwindigkeit von 2,96 $\mu\text{m/s}$ wurde bei beiden Bewegungen eingehalten.

In dieser Hinsicht ist die Vorrichtung für genaue Verfahrbewegungen geeignet.

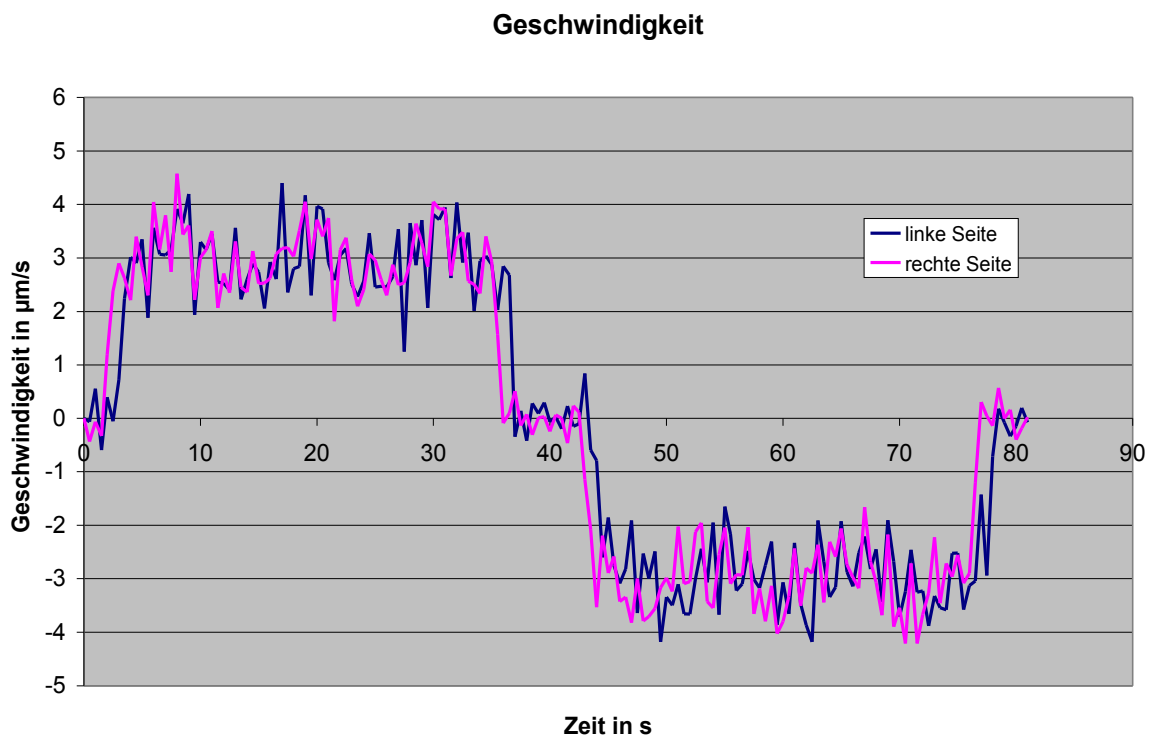


Abbildung 10: Darstellung der Geschwindigkeiten des linken und rechten Jochs

Bestimmung des Umkehrspiels

Das Umkehrspiel gibt den Wert des Weges an, der beim Übergang von einer Zugbeanspruchung zu einer Druckbeanspruchung zurückgelegt wird, während die Kraft wieder ansteigt. Es bezeichnet das Spiel zwischen den einzelnen Bauteilen und Verbindungen von den Spindeln bis hin zur Probe.

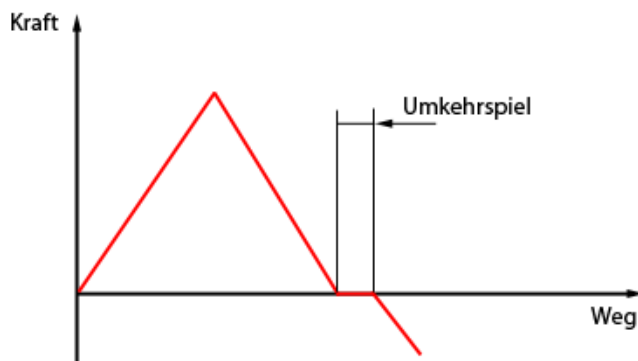


Abbildung 11: Darstellung zur theoretischen Ermittlung des Umkehrspiels

Es wurde ein Versuch gestartet bei dem eine Zugkraft von 300 N aufgebaut und eine kurze Zeit gehalten wurde. Danach wurde diese Kraft heruntergefahren bis eine Druckkraft von 150 N erreicht wurde. Das Kraft – Weg – Diagramm (Abb. 12) lässt erkennen das keine Wegdifferenz bei dem Übergang von Zug- in Druckkraft auftritt. Das zeigt, dass kein Umkehrspiel in der Vorrichtung vorhanden ist. Auch bei der Darstellung der Kraft über die Zeit (Abb. 13) lässt sich kein Umkehrspiel erkennen.

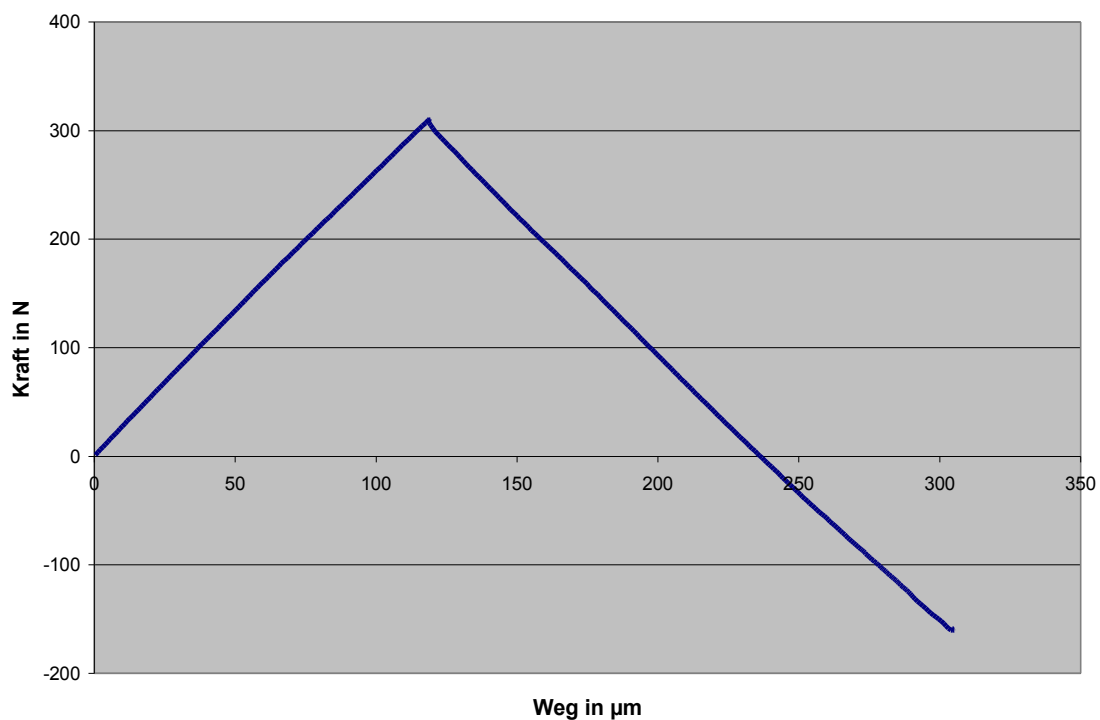


Abbildung 12: Kraft-Weg-Diagramm zur Ermittlung des Umkehrspiels

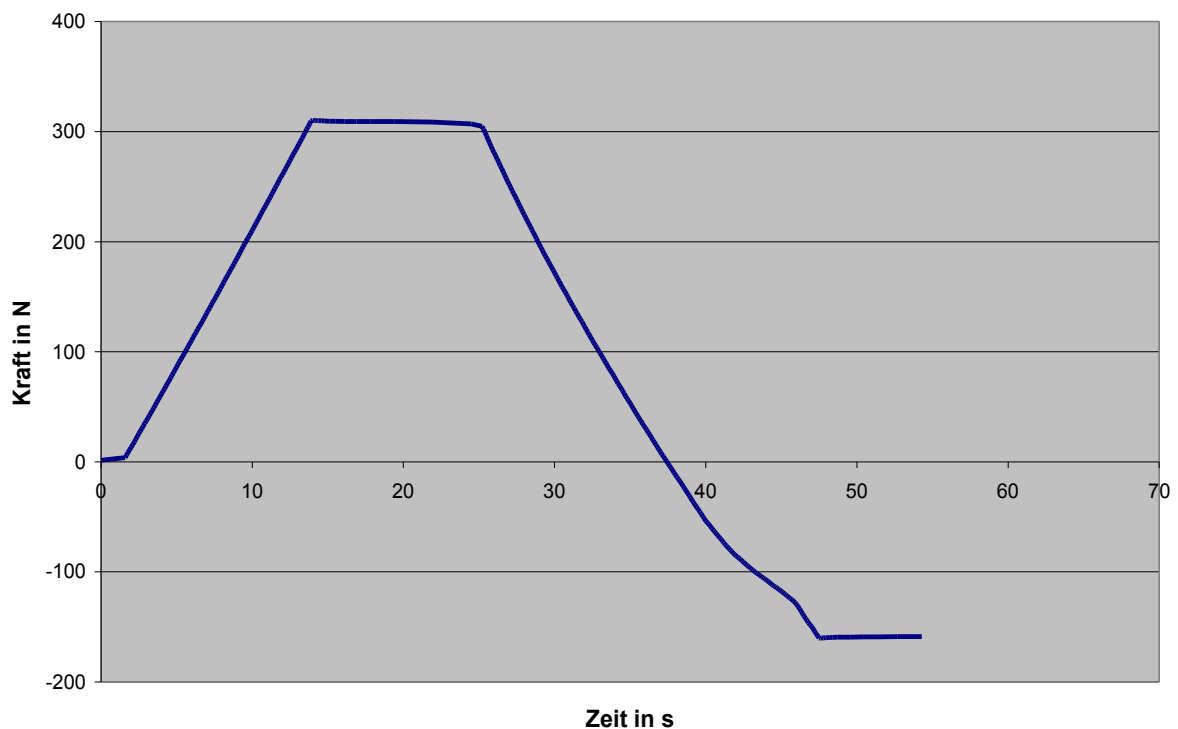


Abbildung 13: Kraft-Zeit-Diagramm zur Ermittlung des Umkehrspiels

5.2 Betrachtung der Verfahrswege und Geschwindigkeiten

Die wichtigste Funktion der Belastungsvorrichtung ist aufgrund der Aufgabe und des Arbeitsfeldes, die höchstgenaue Weg- und Geschwindigkeitssteuerung. Um dies zu überprüfen wurden schon im Praktikum einige Versuche durchgeführt.

Bei jenen Versuchen wurden die beiden Schrittmotoren mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten angesteuert und die Vorrichtung ohne Last verfahren. Es wurde untersucht ob der eingestellte Verfahrsweg von 100 μm und die Geschwindigkeiten von 50 und 100 Schritten pro Sekunde eingehalten wurden.

Berechnung der Geschwindigkeiten:

$$100 \frac{\text{Schritte}}{\text{s}} : 100 \frac{\text{Schritte}}{\text{s}} \cdot \frac{0,0296296 \mu\text{m}}{\text{Schritt}} = \underline{\underline{2,96 \mu\text{m}}}$$

$$\frac{50 \text{ Schritte}}{\text{s}} : \frac{50 \text{ Schritte}}{\text{s}} \cdot \frac{0,0296296 \mu\text{m}}{\text{Schritt}} = \underline{\underline{1,48 \mu\text{m}}}$$

(6)

Das Messfeld zur Auswertung lag jeweils auf dem unteren Spannelement. Das rote Messfeld beschreibt die Verschiebung zum blauen Messfeldes, siehe Abbildung 14.

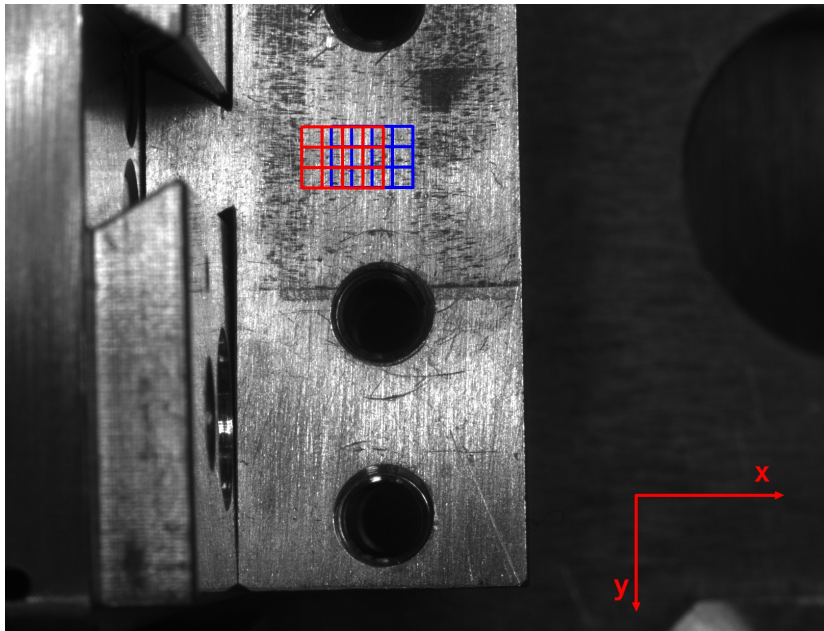


Abbildung 14: Messbild und Messfeld zur Auswertung durch VEDDAC

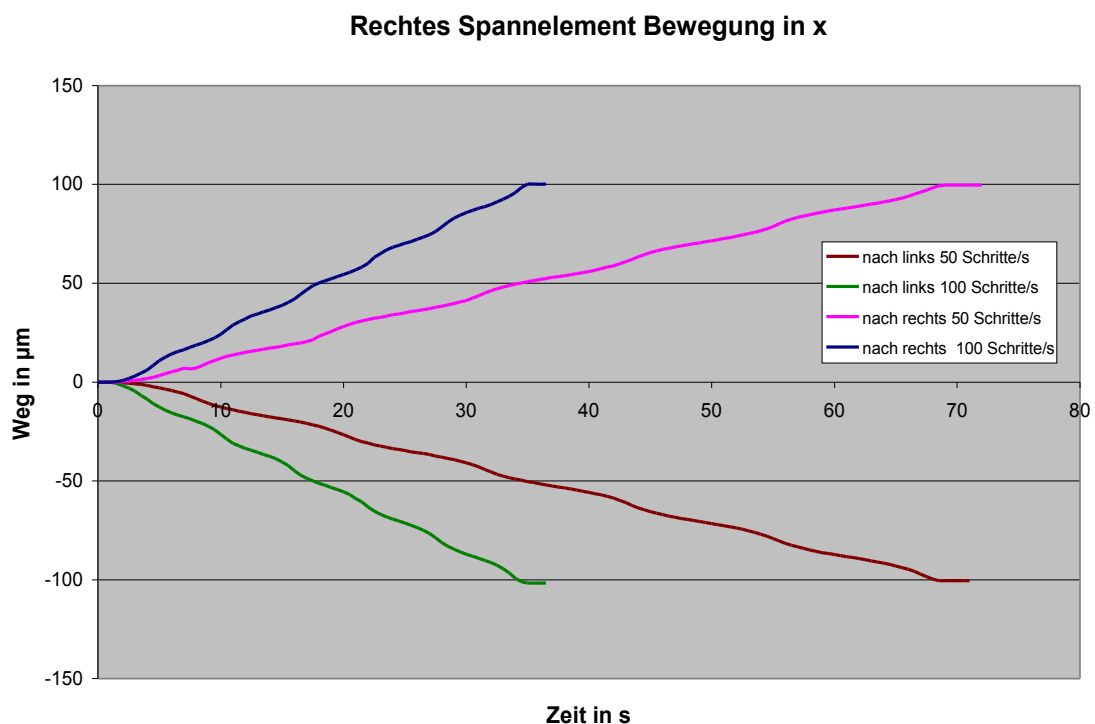


Abbildung 15: Weg-Zeit-Diagramm zur Betrachtung des Verfahrensweges des rechten Spannelements in x - Richtung

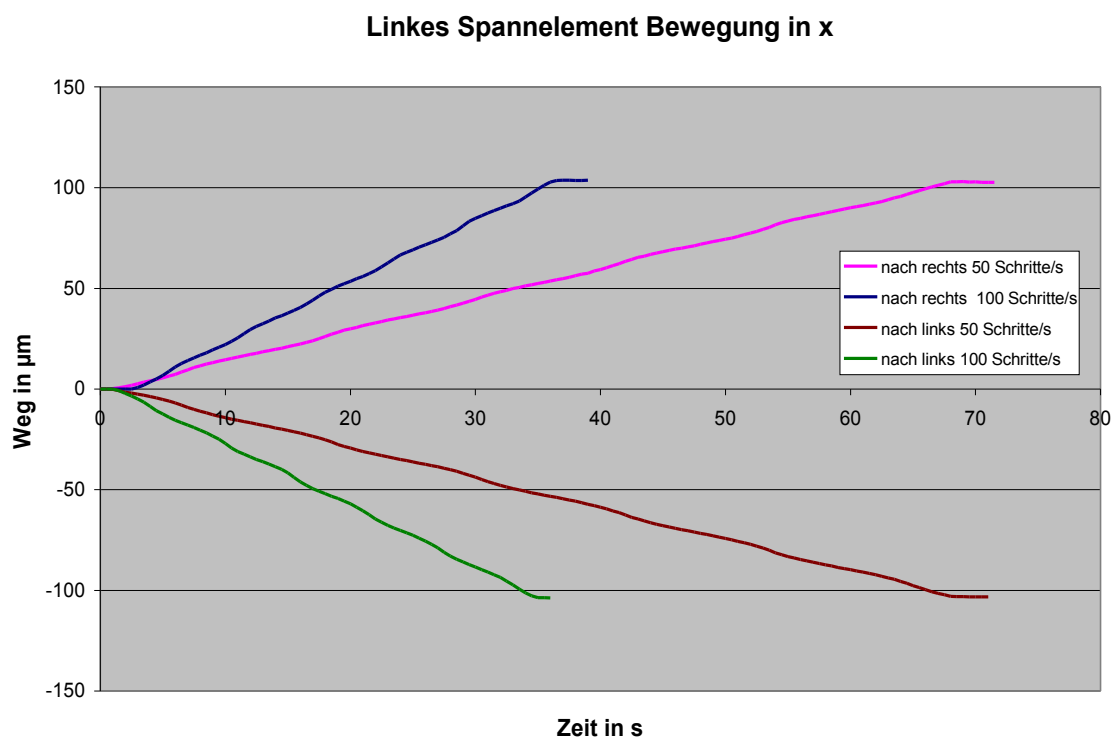


Abbildung 16: Weg-Zeit-Diagramm zur Betrachtung des Verfahrensweges des linken Spannelements in x - Richtung

Abbildung 15 und Abbildung 16 zeigen die durch VEDDAC ermittelten Weg-Zeit-Kurven des jeweiligen Jochs bei den unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Die jeweiligen Endwerte bei den verschiedenen Geschwindigkeiten betrugen:

Tabelle 1: Wegauswertung durch VEDDAC

	Versuch	Gemessener Weg in VEDDAC in μm	Abweichung in %
Rechtes Spannelement	Nach links 50 S/s	100,442	0,442
	Nach links 100 S/s	101,528	1,528
	Nach rechts 50 S/s	99,723	0,277
	Nach rechts 100 S/s	100,194	0,194
Linkes Spannelement	Nach links 50 S/s	102,589	2,598
	Nach links 100 S/s	102,974	2,974
	Nach rechts 50 S/s	102,386	2,386
	Nach rechts 100 S/s	103,248	3,248

Aus Erfahrungswerten der Firma ging hervor, dass die gemessenen Wege und deren Abweichungen zum eigentlichen Wert, in einem Bereich liegen der akzeptabel ist.

Tabelle 2: Geschwindigkeitsauswertung durch VEDDAC

	Versuch	Gemessene Geschwindigkeit in VEDDAC in $\mu\text{m/s}$	Abweichung in %
Rechtes Spannelement	Nach links 50 S/s	1,39	6,08
	Nach links 100 S/s	2,82	4,73
	Nach rechts 50 S/s	1,40	5,41
	Nach rechts 100 S/s	2,78	6,08
Linkes Spannelement	Nach links 50 S/s	1,46	1,35
	Nach links 100 S/s	2,90	2,03
	Nach rechts 50 S/s	1,45	2,03
	Nach rechts 100 S/s	2,67	9,8

Betrachtet man zum Beispiel den Versuch mit 50 Schritte/s, siehe Abbildung 17, so erkennt man, dass der Graph des Weges keine Gerade ist, sondern Wellen aufweist. Das Auftreten der Wellen spiegelt sich auch in den Geschwindigkeiten wieder. Vor jedem „Berg“ steigt die Geschwindigkeit an und fällt dann im „Tal“ wieder ab. Die Durchschnittsgeschwindigkeit von $1,43 \mu\text{m/s}$ stimmt unter Berücksichtigung von Messfehlern mit der errechneten Geschwindigkeit überein.

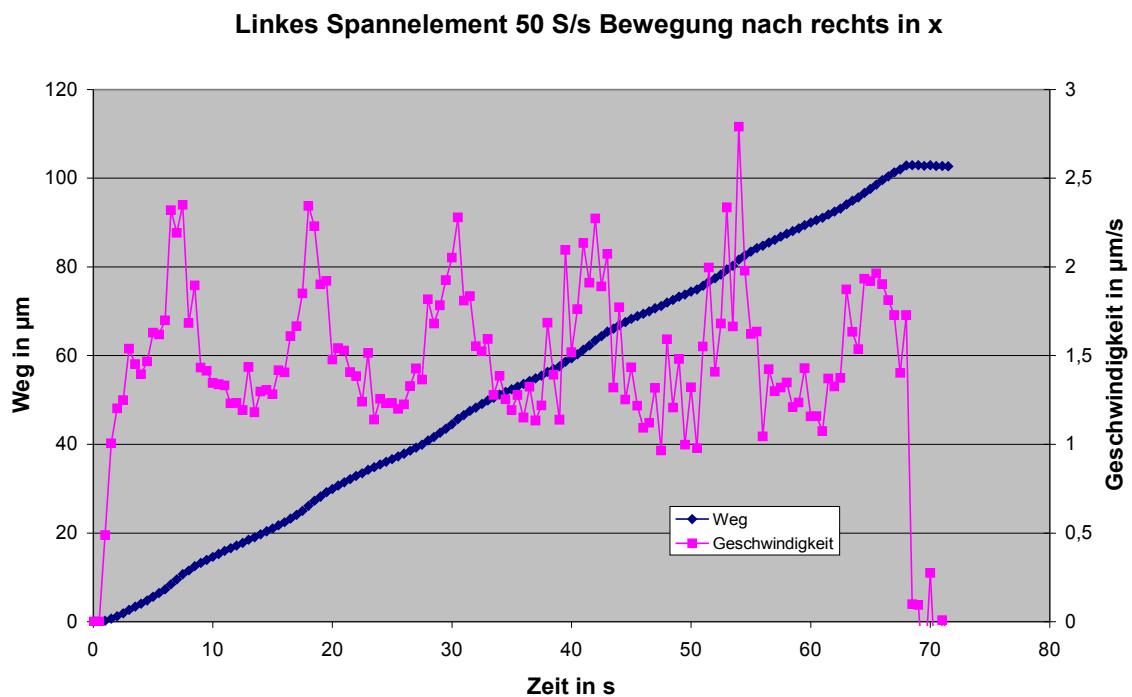


Abbildung 17: Weg-Zeit-Geschwindigkeit-Diagramm des linken Spannelements in x - Richtung

Desweiteren wurde auch die Bewegung der Spannelemente in y Richtung betrachtet. Diese dürfte theoretisch Null sein. Bei der Auswertung wurde aber festgestellt, dass eine Verschiebung der linken Spannbacke stattfand, siehe Abbildung 18.

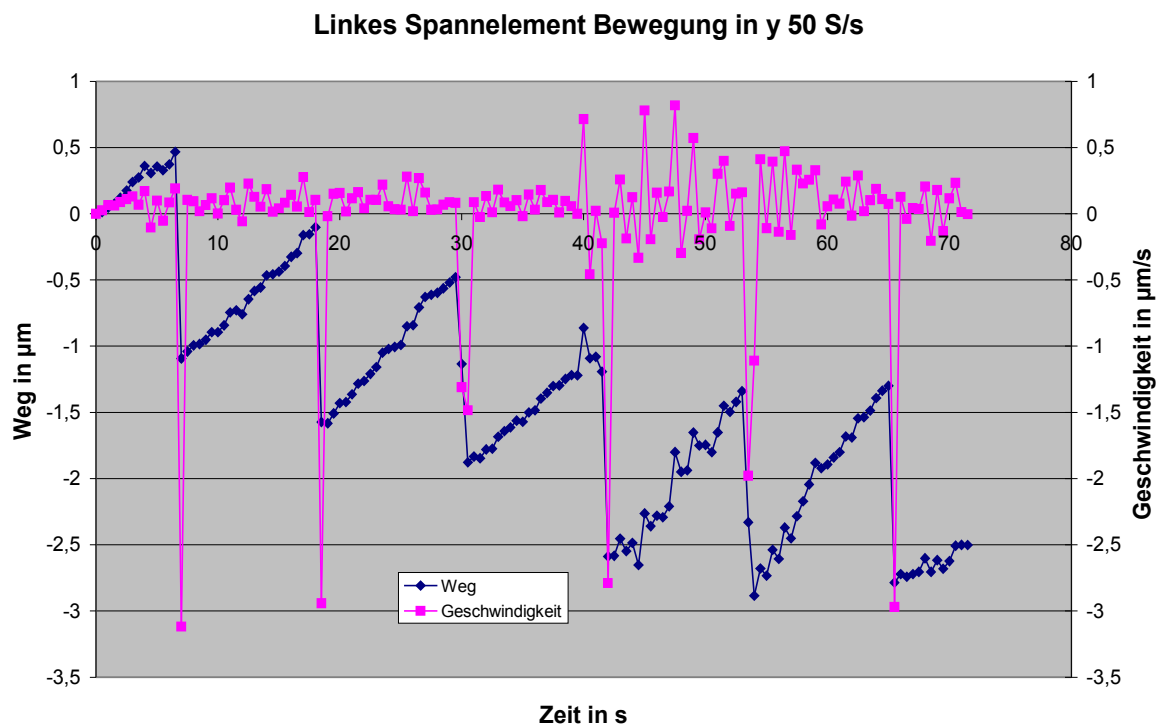


Abbildung 18: Weg-Zeit-, Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm des linken Spannelements in y-Richtung

Diese Verschiebung ist wiederum keine Gerade, sondern weist ca. $1,5 \mu\text{m}$ große Sprünge auf. Auch zu sehen in den Geschwindigkeiten.

Stellt man nun die Schwingung in x und y Richtung und die dazugehörigen Geschwindigkeiten dem gefahrenen Weg gegenüber entsteht folgendes Diagramm, siehe Abbildung 19.

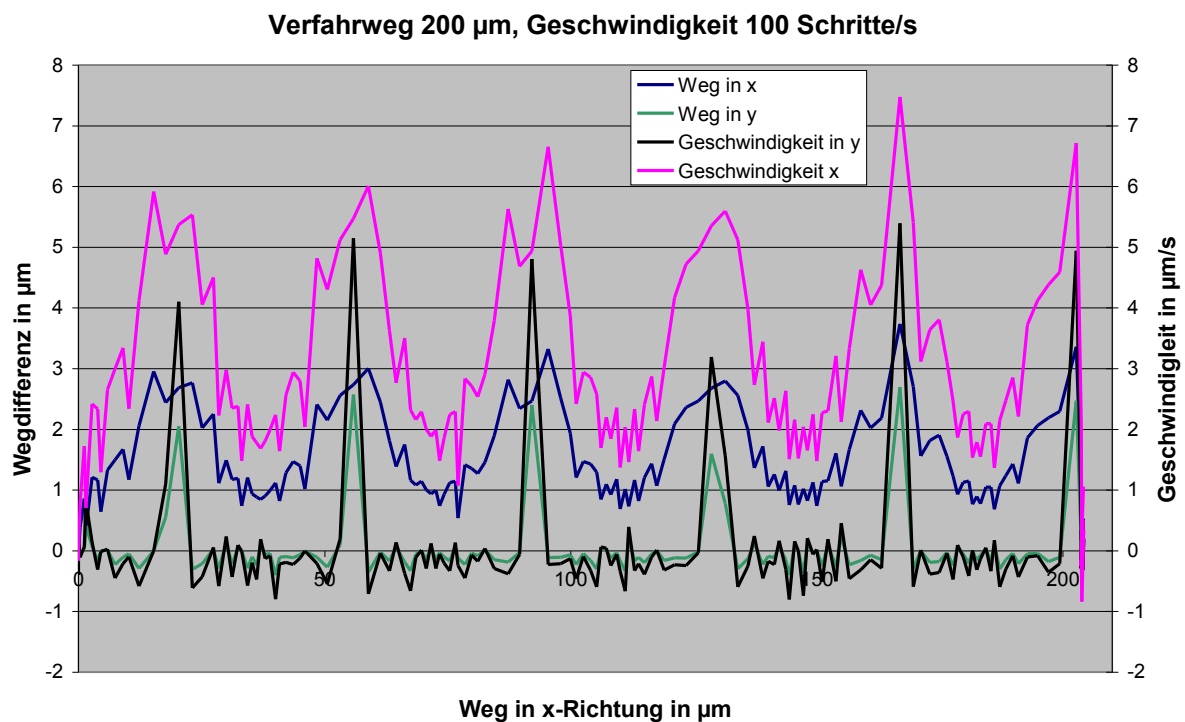


Abbildung 19: Wegänderung über Verfahrweg in x-Richtung, Geschwindigkeit über Verfahrweg in x-Richtung

Die auftretenden Maxima der Geschwindigkeits- und Wegkurven treten alle $35 \mu\text{m}$ auf. Betrachtet man die Geschwindigkeitskurven und zieht man von dem Maximum des Ausschlags die jeweilige Grundgeschwindigkeit ab, so hat der Geschwindigkeitsanstieg in x sowie in y immer ungefähr den gleichen Wert. Er beträgt im Mittelwert ca. $4 \mu\text{m/s}$.

Die Idee war nun die Vorrichtung so zu betrachten, dass im Messbild das gesamte Joch mit Spindelführung zu sehen ist. Um dies zu erreichen wurde ein Objektiv mit einer Brennweite von $8,5 \text{ mm}$ gewählt. Der Versuch wurde wiederholt indem $100 \mu\text{m}$ bei 100 Schritten / Sekunde gefahren wurde. Da bei den Versuch mit dem 25 mm Objektiv drei Sprünge pro $100 \mu\text{m}$ auftraten, wurde auch hier damit gerechnet. Dies war aber nicht der Fall. Die Auswertung ergab das nur ein Sprung auftrat.

Um Fehler in der Auswertung meinerseits auszuschließen wurde diese in zweifacher Ausführung durchgeführt. In beiden wurden die selben Ergebnisse ermittelt. Somit können Fehler in der Auswertung hinsichtlich Korrelationsparameter und richtige Bedienung der Software ausgeschlossen werden. Bei genauerer Untersuchung durch das Setzen von mehreren Messpunkten wurde festgestellt, dass die Sprünge nicht überall auf der Vorrichtung auftreten.

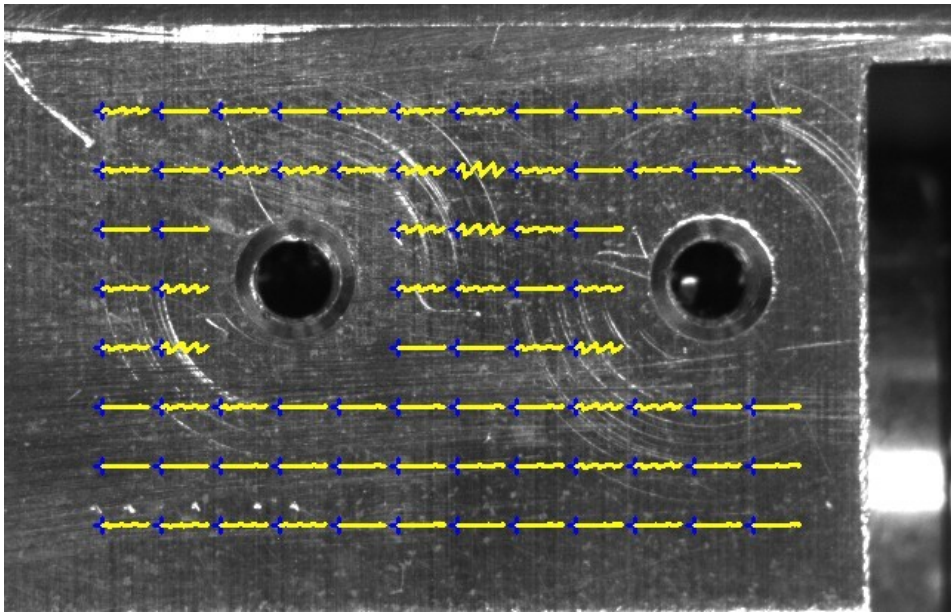


Abbildung 20: Messfeld mit Sprüngen

Da so eine Bewegung eines starren Bauteils nicht möglich ist, kann dies nur an der Korrelationssoftware liegen. Lässt man sich die Bewegungen in Pixel angeben und stellt die Bewegung in y über die in x dar, entstehen folgende Diagramme.

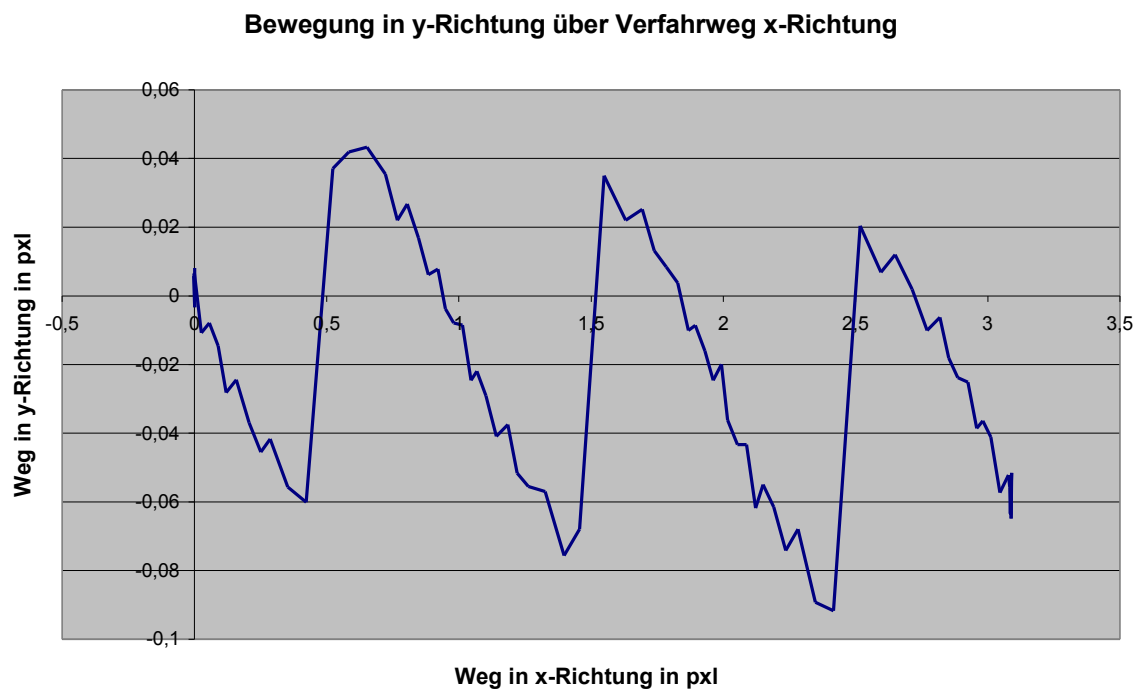


Abbildung 21: Bewegung in y-Richtung über Fahrweg in x-Richtung, Bildaufnahme mit 25 mm Objektiv

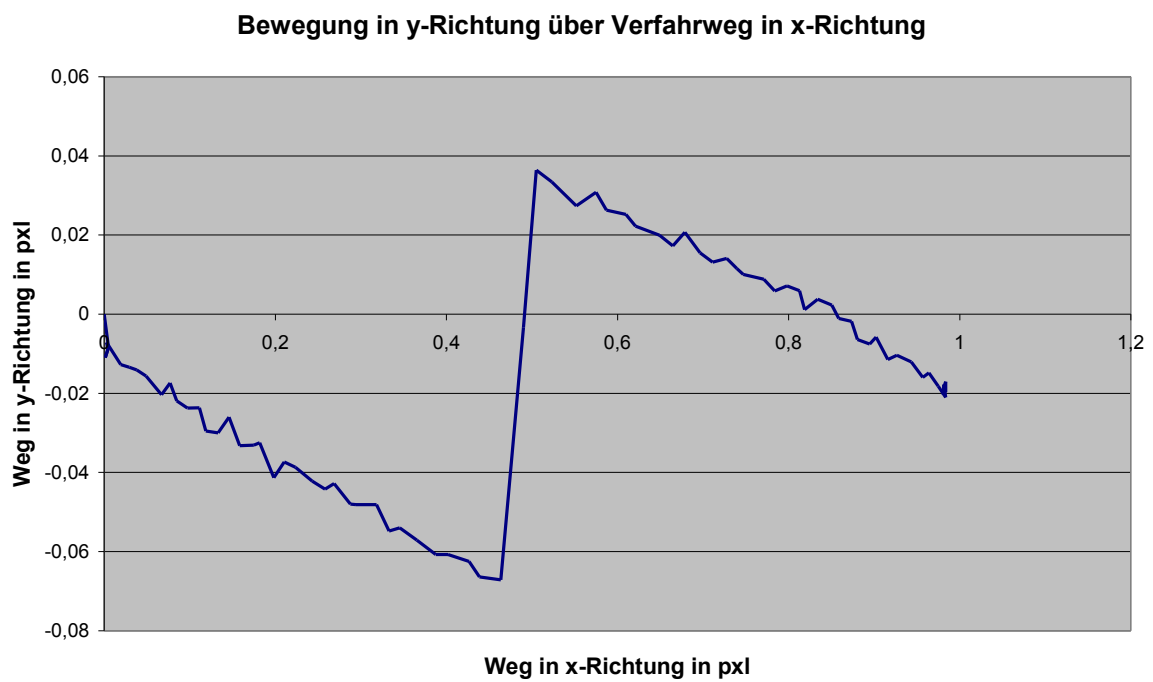


Abbildung 22: Bewegung in y-Richtung über Fahrweg in x-Richtung, Bildaufnahme mit 8,5 mm Objektiv

Nun erkennt man, dass die Sprünge immer aller halben Pixel auftreten.

Durch Nachfrage beim Programmierer der Software stellte sich heraus, dass dies durch Rundungsfehler auftritt. Auch die Bauteiloberfläche spielt eine Rolle. In Abbildung 20 erkennt man, dass die Messpunkte bei denen die Sprünge auftreten dort platziert sind, wo sich besonders viele Bearbeitungsspuren befinden. Aufgrund von Reflexionen können weiterhin Fehler in der Auswertung entstehen. Um dies zu vermeiden wurden Grauwertmuster auf die Vorrichtung aufgebracht, die nun eine geeignete Fläche zur Korrelation bieten, siehe Abbildung 23.

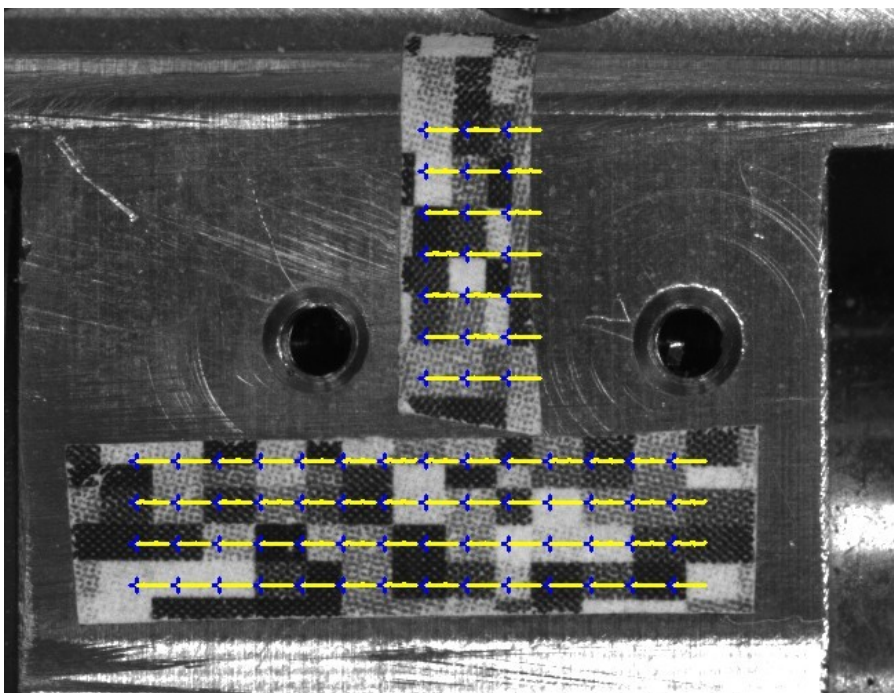


Abbildung 23: Messfeld auf Grauwertmuster

Die Sprünge kann man nicht ganz verschwinden lassen, aber auf ein Minimum reduzieren. In Abbildung 24 ist dargestellt wie sich die Nutzung der Grauwertmuster auf die Auswertung auswirkt. Die grüne Kurve wurde aus einem Versuch ermittelt bei dem zur Auswertung Grauwertmuster auf die Vorrichtung aufgebracht wurden (Abb. 23). Die großen Sprünge konnten eliminiert werden. Da sowohl in der grünen als auch in der blauen Kurve kleinere Sprünge auftreten, können diese als Schwingungen der Vorrichtung angenommen werden.

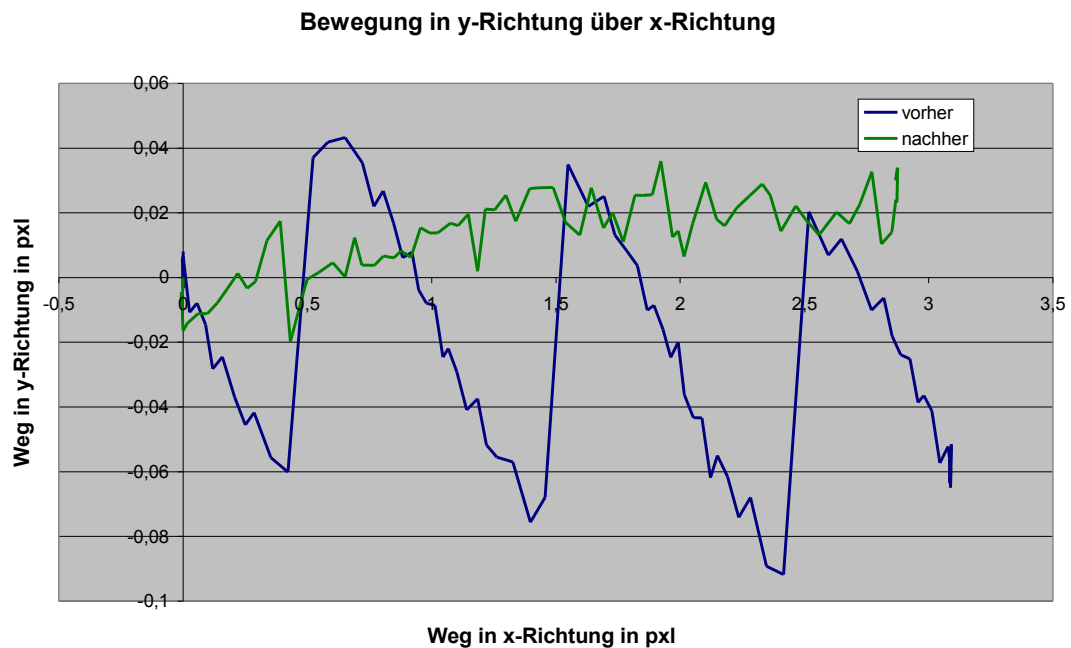


Abbildung 24: Vergleich Sprünge vorher und nachher

5.3 Betrachtung der Spannvorrichtung

In diesem Kapitel soll die konstruktive Umsetzung und die Funktionsweise der Probenspannung der Vorrichtung betrachtet werden. Die Einspannung ist für genormte Zug- und Biegeproben ausgelegt. Zur Zeit liegen nur Spannelemente für Zugproben vor. Die Spannelemente sind durch eine Schwalbenschwanzführung und jeweils zwei Innensechskantschrauben mit dem Deckel verbunden. Die Spannung der Proben übernehmen zwei rechteckige Spannelemente aus Aluminium, die mit zwei Innensechskantschrauben senkrecht verbunden werden. Weiterhin gehören zur Spannvorrichtung die Heizeinrichtung, der thermische Isolator sowie die Kraftmessdose (Abb. 25).

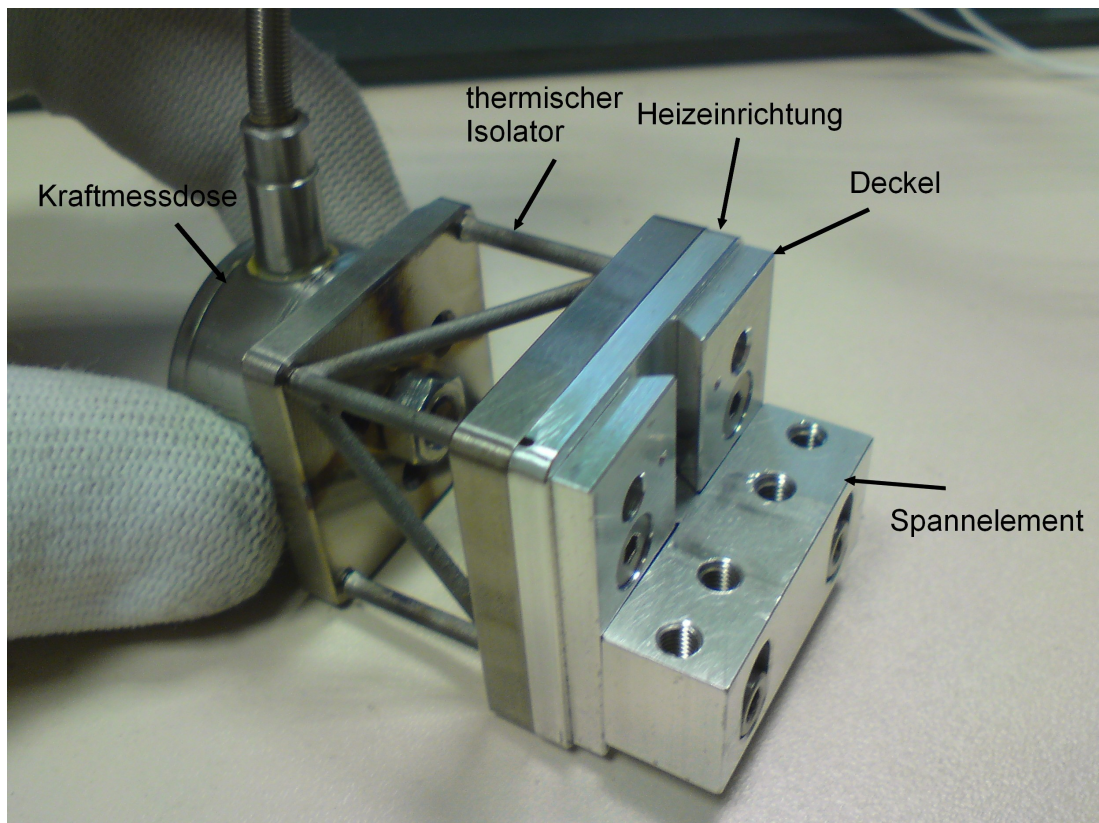


Abbildung 25: Aufbau der Spannvorrichtung

Bei mehreren Zugversuchen wurde festgestellt, dass die Spannelemente nicht immer die Spannkraft aufbringen, die notwendig ist, um die Probe festzuhalten. Bei dem Versuch eine Zugkraft von 300 N aufzubringen, rutschte die Zugprobe aus der Spannvorrichtung (Abb. 26). Der Grund für die zu geringe Spannkraft liegt einerseits in der zu geringen Oberflächenrauheit der Spannflächen und andererseits sind die Spannelemente nicht immer parallel zueinander eingespannt, was zur Folge hat, dass die Probe nicht über die gesamte Fläche gespannt ist (Abb27).



Abbildung 26: Darstellung des Austretens der Probe aus der Spannvorrichtung

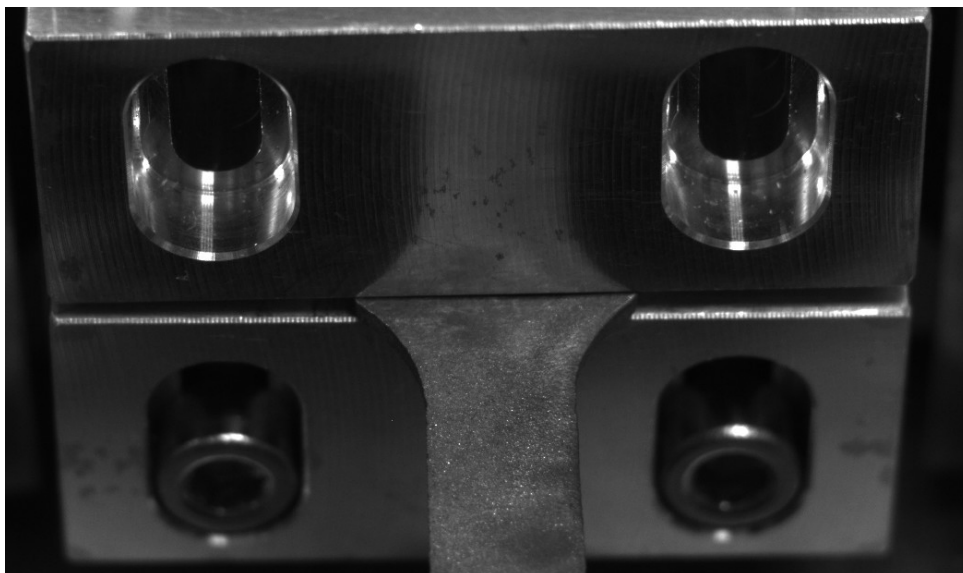


Abbildung 27: Darstellung der schiefen Einspannung

Während der Auswertung mit dem Korrelationsprogramm VEDDAC wurden Unregelmäßigkeiten im Bewegungsablauf der Vorrichtung festgestellt. Bei dem

Versuch eine Zug- bzw. Druckkraft von 200 N auf die Probe aufzubringen wurden mit einer CCD-Kamera Bildfolgen aufgenommen. Die Auswertung ergab, dass die jeweilige Spannbacke, besonders die linke, sich augenscheinlich in die entgegengesetzte Richtung wie das jeweilige Joch bewegte. In der Abbildung 28 erkennt man, dass das Joch, Messfeld links oben, wie bei einem Zugversuch vorgesehen sich nach links bewegt. Das rote Messfeld zeigt die Verschiebung zum blauen Messfeld während des Versuches an.

Die beiden Spannbacken bewegten sich aber dem Zugversuch untypisch in die entgegengesetzte Richtung. Auch im Weg-Zeit-Diagramm (Abb. 29) lässt sich erkennen, dass besonders die linke Spannbacke sich der typischen Bewegungsrichtung eines Zugversuches entzieht. Auch beim Versuch eine Druckkraft von 200 N auf die Probe aufzubringen entstand ein ähnliches Messbild, siehe Abbildung 30. Zu sehen ist eine „Druckbewegung“ des Jochs und eine „Zugbewegung“ der Spannbacken. Auch aus dem Weg-Zeit-Diagramm (Abb. 31) lassen sich ähnliche Bewegungsabläufe erkennen.

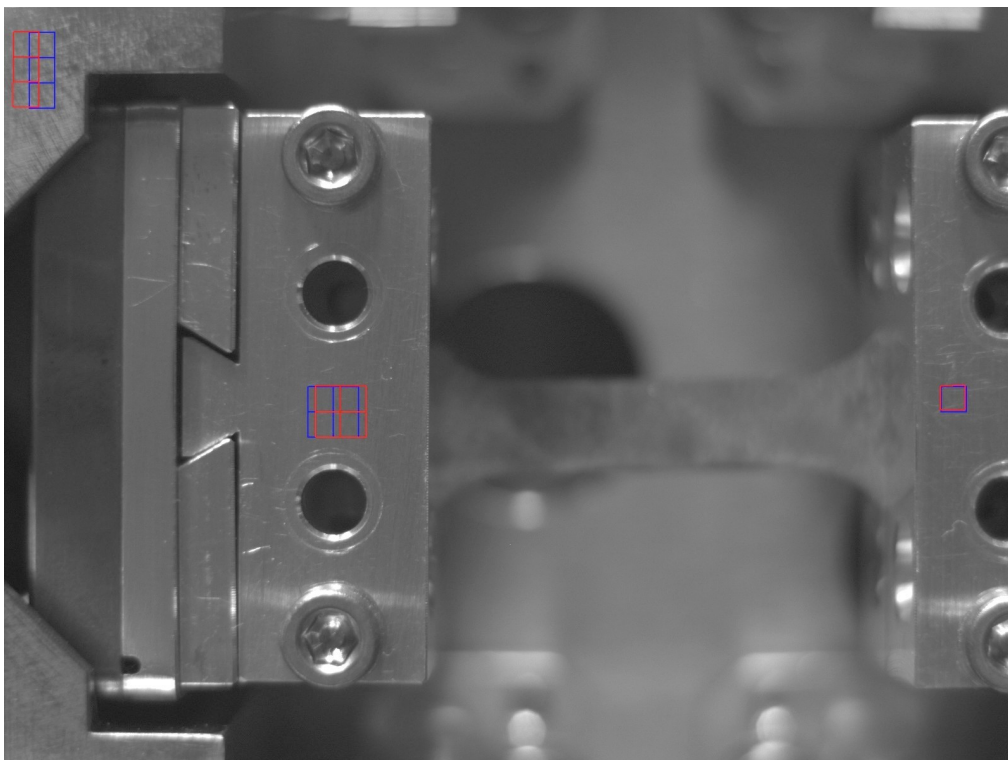


Abbildung 28: Messbild VEDDAC 200 N Zug

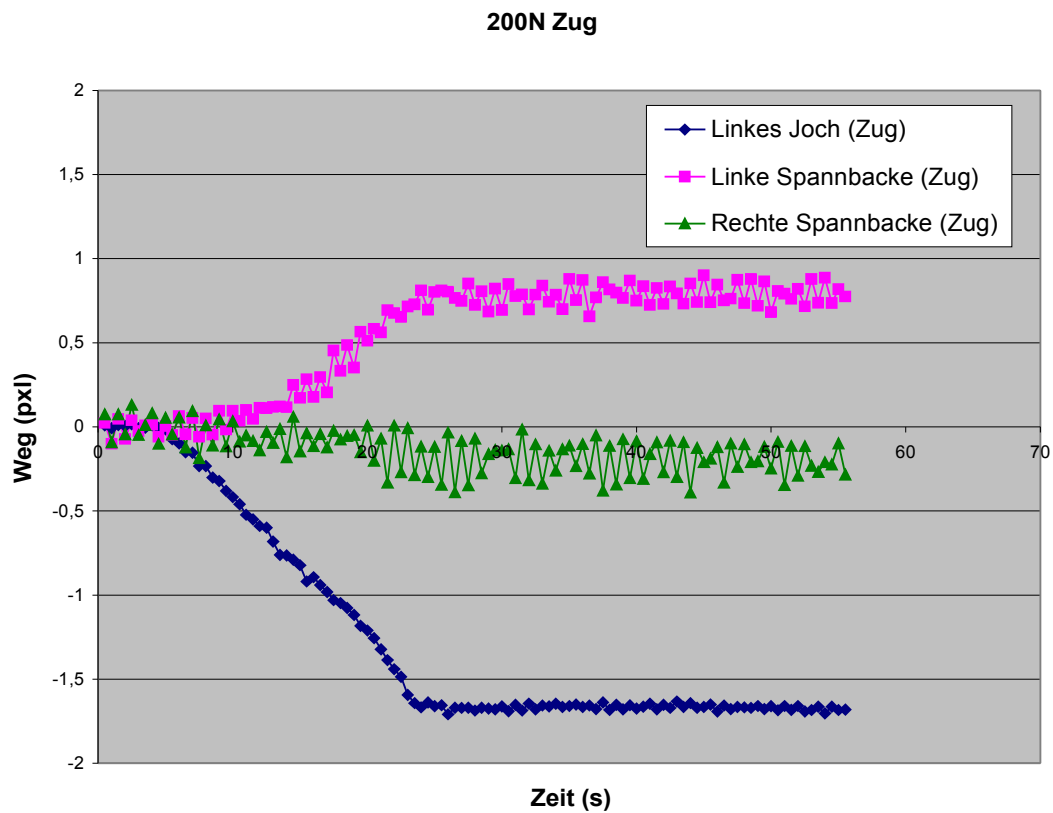


Abbildung 29: Weg-Zeit-Diagramm des linken Spannelements, 200 N Zug

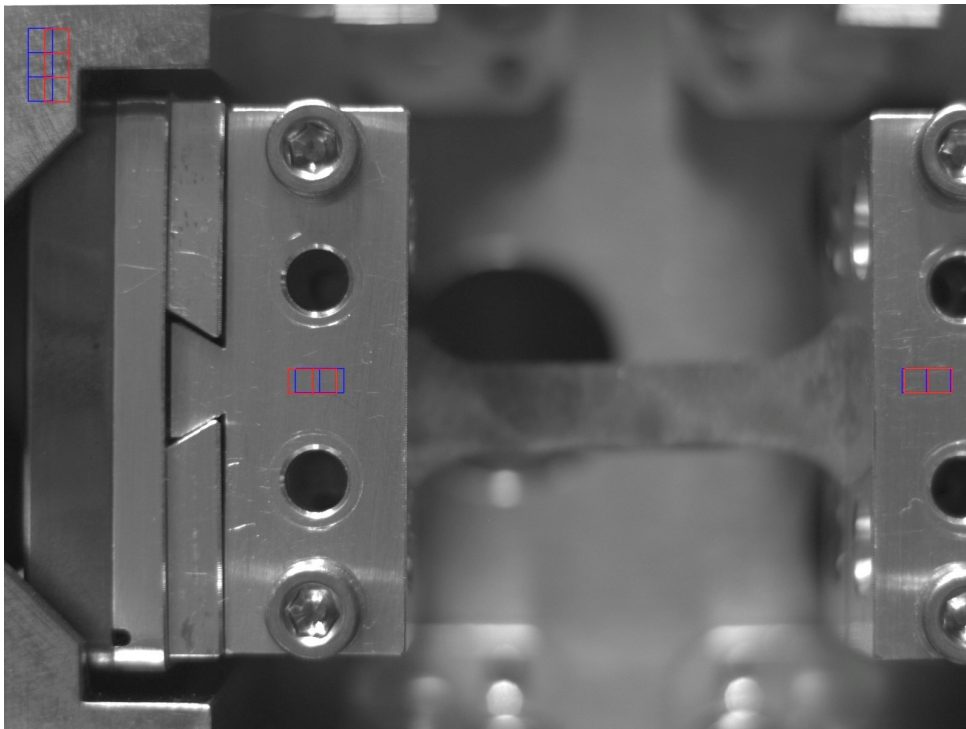


Abbildung 30: Messbild VEDDAC 200 N Druck

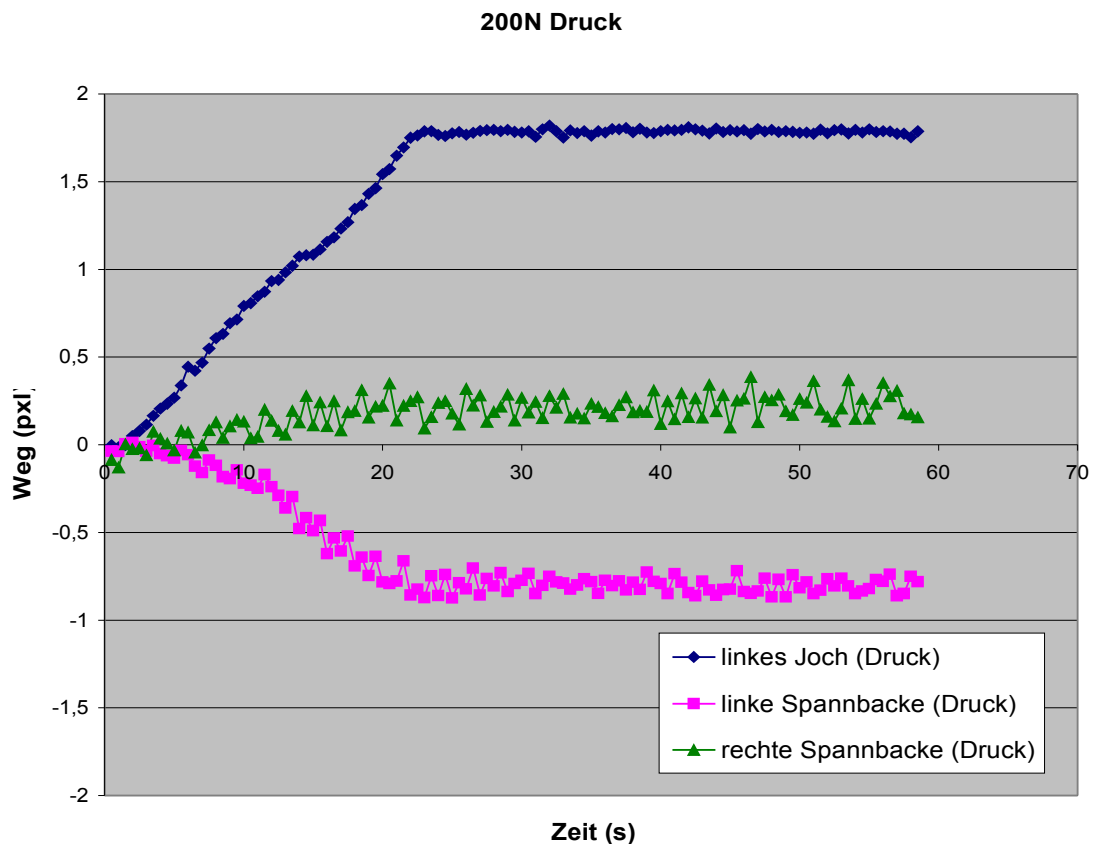


Abbildung 31: Weg-Zeit-Diagramm des linken Spannelements 200 N Druck

Um sich ein genaueres Bild der verschiedenen Bewegungen zu machen, wurde ein größeres Messbild gewählt, wobei mehrere Bauteile betrachtet wurden. In der Abbildung 33 bzw. 34 wird die Auswertung eines Zug- bzw. Druckversuches von 200 N dargestellt. Wenn man nun die Messfelder der Deckel und der Heizplatte anschaut, erkennt man, dass diese den Bewegungen am Joch nicht exakt aber nahezu gleich kommen.

Bei Betrachtung der Messfelder der beiden Spannbacken erkennt man weiterhin das sich diese nicht nur nach innen bewegen, sondern sich auch verdrehen. Besonders beim Zugversuch in Abbildung 33. Dessen Grund kann in der schiefen Einspannung der Probe liegen.

Bei diesen Versuchen wurde darauf geachtet die Probe ordnungsgemäß einzuspannen d.h. die Schrauben wurden so angezogen, dass die Möglichkeit des Austretens der Probe aus der Spannung gering war.

Die Verschiebung der Spannbacken in die entgegengesetzte Richtung der gewollten

Bewegung lässt sich nun auf die Konstruktion der Spannvorrichtung und der angrenzenden Bauteile zurückführen. Als erstes ist die Schwalbenschwanzführung zu benennen. Ihre Toleranzen sind für die Anforderungen der Mikrobelastungsvorrichtung zu grob gewählt. Bei Versuchen mit höheren Kräften bis 400 N erkennt man, in Abbildung 35 dargestellt, dass sich die obere Spannbacke in der Führung verschiebt. Dies hat auch zur Folge, dass die beiden Innensechskantschrauben, die die Spannbacken verbinden und so die Spannkraft aufbringen, auf Biegung beansprucht werden und auch nachgeben. Um dies zu vermeiden wurden auch die oberen Spannbacken noch mit zwei Schrauben an dem Deckel verschraubt. Dies hatte zur Folge, dass eine höhere Steifigkeit der Spannelemente erreicht wurde und sich diese nun der eigentlichen Bewegung anpassen.

Bei genauerer Untersuchung wurde jedoch festgestellt, nicht nur die Spannbacken sondern die gesamte Baugruppe (thermischer Isolator, Heizeinrichtung, Deckel und Spannelemente, sowie auf der linken Seite die Kraftmessdose) sich während des Versuchs nach unten verschieben. Da die linke Baugruppe nur durch eine Mutter und die Rechte durch drei Schrauben mit dem Joch verbunden sind, ist somit nur eine waagerechte Belastung, ohne eine senkrechte Verschiebung, möglich. Demzufolge besteht die Annahme, dass die Probe nicht mittig also nicht in der Kraftachse eingespannt ist. Ist die Probe außermittig eingespannt, so entsteht bei einer Zugbeanspruchung eine weitere Kraft die als Moment auf die Spannvorrichtung wirkt und die Verkipfung hervorruft, siehe Abbildung 32.

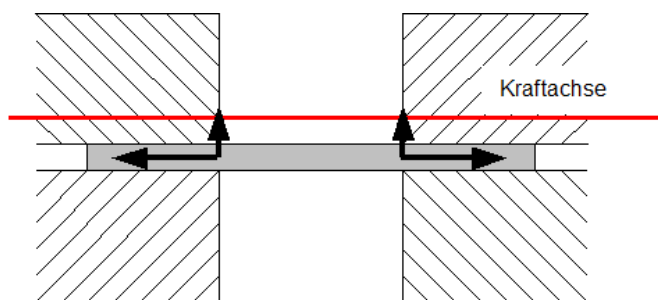


Abbildung 32: Skizze zur Kraftachse

Die Kraftachse liegt im Mittelpunkt der Spindeln und somit im Mittelpunkt der Kraftmessdose. Die Spannelemente sind konstruktiv so ausgelegt, dass der

Mittelpunkt der Probe in der Kraftachse liegen kann. Da aber unterschiedliche Dicken der Proben vorliegen können, ist es nicht immer möglich diese genau einzuspannen. Bei visueller Kontrolle der Lage des Probenmittelpunktes wurde festgestellt, dass sie sich über dem Mittelpunkt der Kraftachse befindet.

Somit entstehen nicht nur waagerechte sondern auch senkrechte Kräfte. Diese senkrechten Kräfte sind ausschlaggebend, dass es zu solchen unerwünschten Bewegungen kommt. Dies hat weiterhin Folgen für die Steifigkeit der Vorrichtung. Bei weiteren Versuchen muss darauf geachtet werden, dass dieser Effekt weitestgehend umgangen wird. Eine Möglichkeit bestünde darin die Spannelemente vom Deckel leicht zu lösen, die Zugprobe einzuspannen und sie mit ein wenig Kraft zu beanspruchen. Die Probe sollte sich in die Mitte der Kraftachse bewegen. Nun können die Spannbacken am Deckel verschraubt werden.

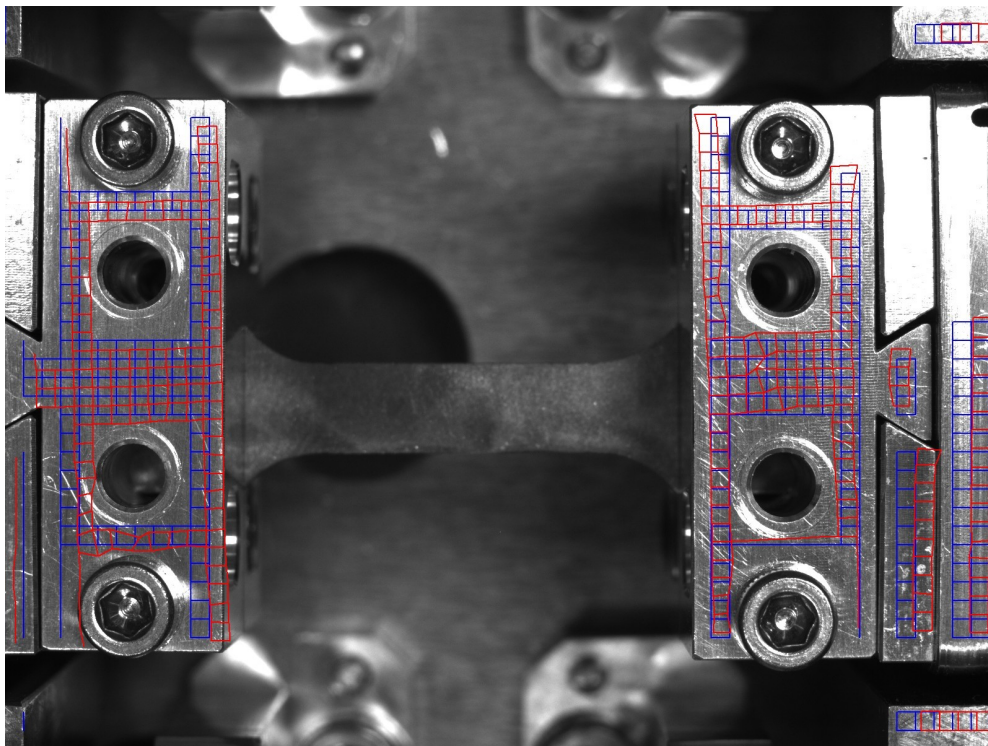


Abbildung 33: Zugversuch 200 N großes Messfeld

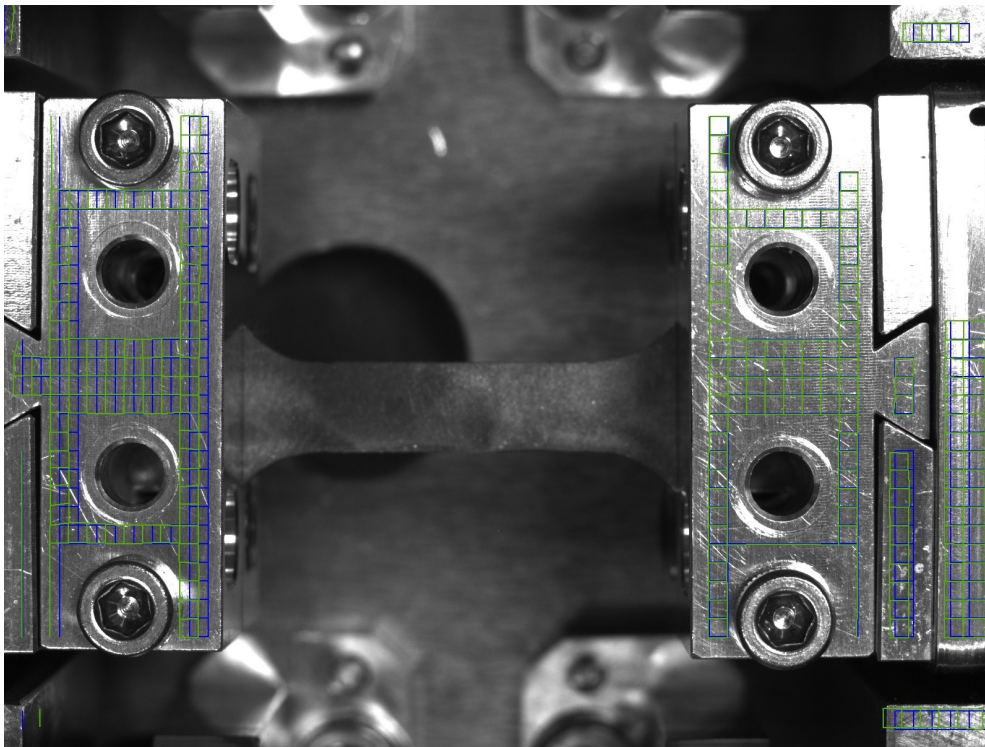


Abbildung 34: Druckversuch 200 N großes Messfeld

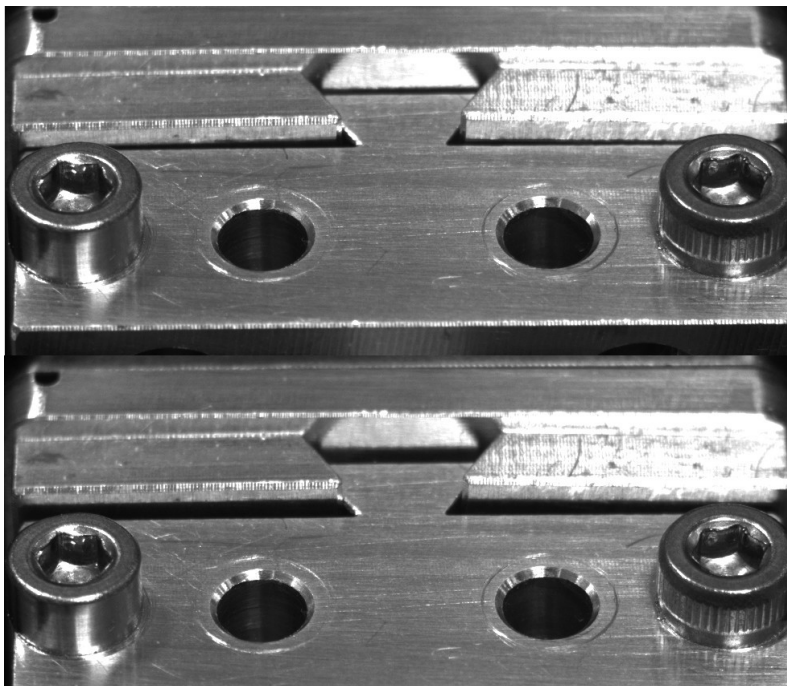


Abbildung 35: Darstellung des Verschiebens der Schwalbenschwanzführung

Um einen Überblick über die Steifigkeit und dem Spiel der einzelnen Bauteile während eines Versuches zu bekommen, wurden die Bewegungsabläufe vom Joch, dem thermischen Isolator, der Heizung, des Deckels und der Spannbacke gegenübergestellt. Dazu wurden jeweils 2 Versuche gestartet und einmal die linke und die rechte Seite der Spannvorrichtung betrachtet. Es wurde eine Zug- bzw. Druckkraft von 300 N aufgebracht.

Betrachtet man nun den Zugversuch (Abb. 36) so ist ersichtlich, dass die linke Seite einen längeren Weg zurück legen musste, um die 300 N aufzubringen, als die rechte Seite. Daraus kann man schließen, dass die Probe auf der rechten Seite einer höheren Spannkraft ausgesetzt war als bei der Linken. Dies bedeutet, jede Probe wird anders eingespannt, was wiederum zu anderen Ergebnissen führt.

Ein Kennzeichen für die Steifigkeit der Baugruppen ist die jeweilige Differenz vom Fahrweg der Einzelteile zum Joch. Aus den Diagrammen in Abbildung 36 und Abbildung 37 lässt sich erkennen, dass die rechte Seite eine höhere Steifigkeit aufweist als die Linke. Es tritt immer eine Wegdifferenz zwischen Joch und angrenzenden Bauteilen auf. Ausschlaggebend für diesen Wert ist die Verbindung zum Joch. Die Verbindung der linken Seite wird über die Befestigung der Kraftmessdose mit dem Joch realisiert. Mittels einer Mutter wird die Kraftmessdose am Joch festgeschraubt. Diese Verbindung ist der Grund warum auf dieser Seite höhere Differenzen zum Joch auftreten als auf der rechten Seite. Die Verbindung der rechten Baugruppe wird über drei Schrauben realisiert. In Abbildung 37 ist der Unterschied der Differenzen zwischen linker und rechter Seite deutlich zu erkennen.

Der thermische Isolator, die Heizeinrichtung und der Deckel vollführen weitestgehend die selben Bewegungen und besitzen somit eine hohe Steifigkeit und kaum Spiel zwischen einander.

Im Zug- wie auch im Druckversuch besteht ein Spiel zwischen Spannbacke und jeweiligem Joch. Die konstruktiven Mängel der Schwalbenschwanzführung haben darauf einen erheblichen Einfluss.

Abbildung 38 zeigt alle möglichen Verschiebungen der Spannvorrichtung auf. Durch eine horizontale Bewegung (grün dargestellt) des Jochs können, hervorgerufen durch die falsche Einspannung, in jedem Freiheitsgrad der Spannvorrichtung nicht erwünschte Verschiebungen (rot dargestellt) auftreten.

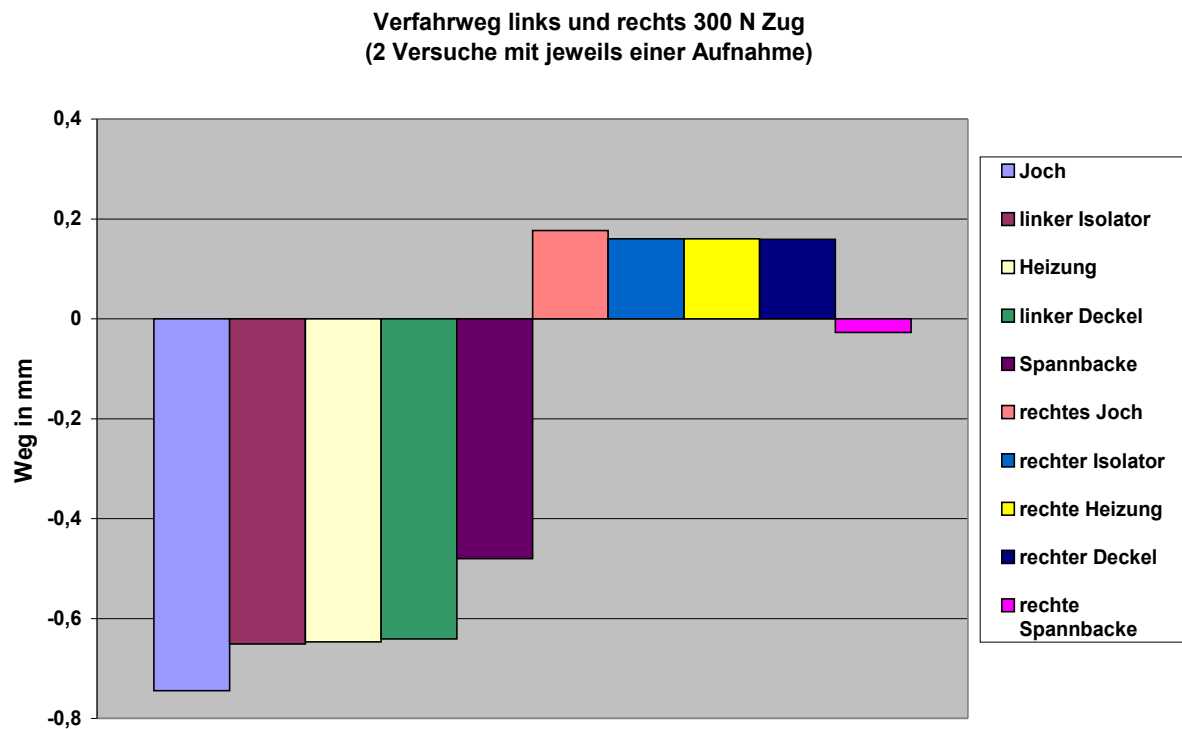


Abbildung 36: Verfahrweg linkes und rechtes Spannelement, Zugversuch 300N

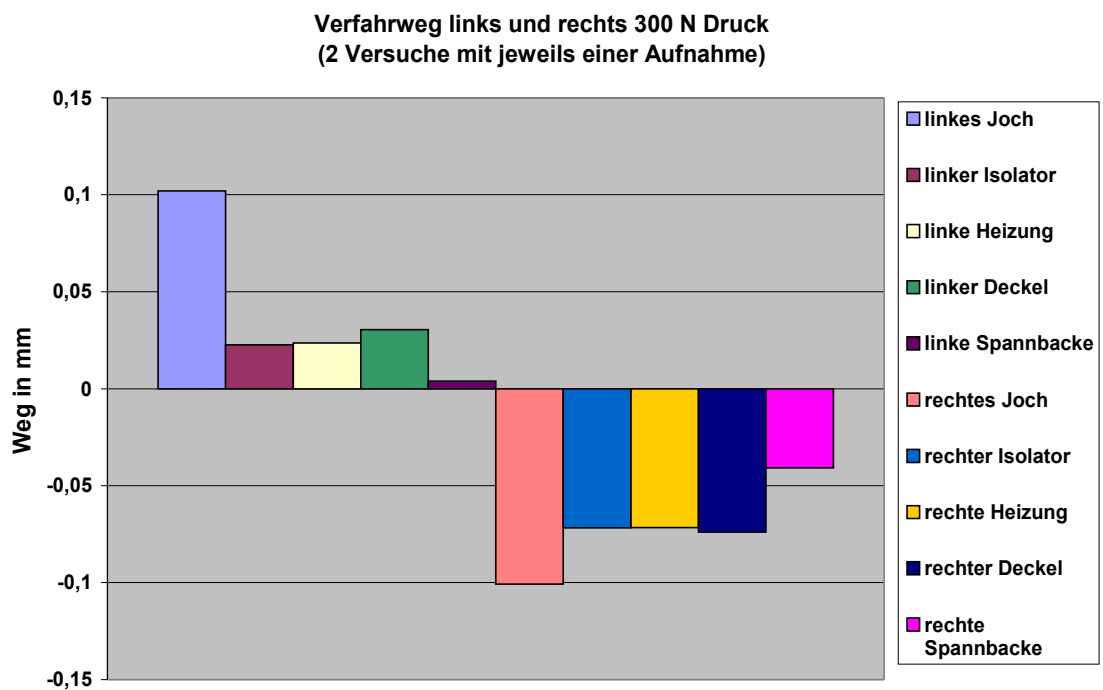


Abbildung 37: Verfahrweg linkes und rechtes Spannelement, Druckversuch 300N

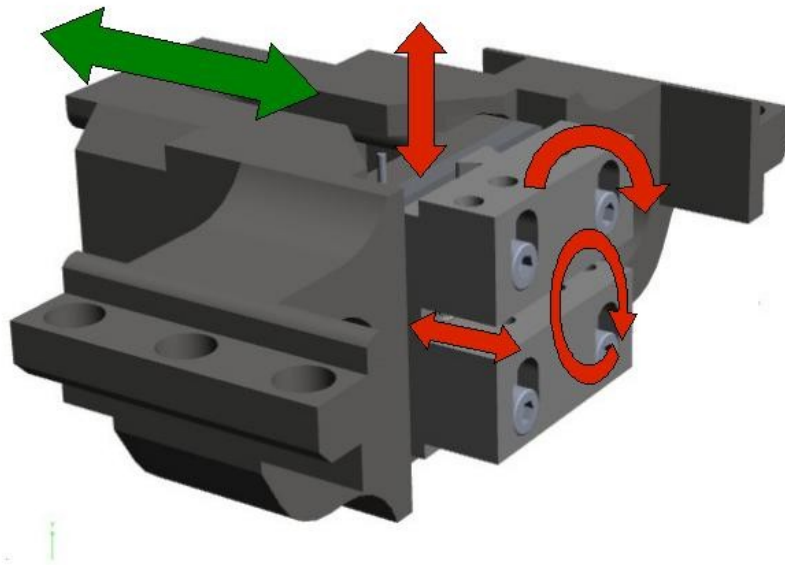


Abbildung 38: Schema über mögliche Verschiebung der Spannvorrichtung

Probe in Kraftachse bringen

Die Zugprobe wurde zwischen den beiden Spannelementen eingespannt. Die Spannelemente wurden leicht von dem Deckeln gelöst, damit sie sich senkrecht bewegen konnten. Unter einer Vorspannung von wenigen Newton richtete sich die Zugprobe so aus, dass sie sich nun in der Kraftachse befand. Jetzt konnten die Spannelemente wieder mit dem Deckel fest verschraubt werden.

Bei der Überprüfung ob wie angenommen die Probe im Mittelpunkt der Spindeln liegt wurde festgestellt, dass dies nicht der Fall war. In Abbildung 39 ist zu erkennen, dass die Probe weit unter dem Mittelpunkt lag. Um zu gewährleisten dass die Probe nahezu im Mittelpunkt liegt, muss eine Markierung an der Spannvorrichtung angebracht werden, um eine genau Einspannung zu ermöglichen.

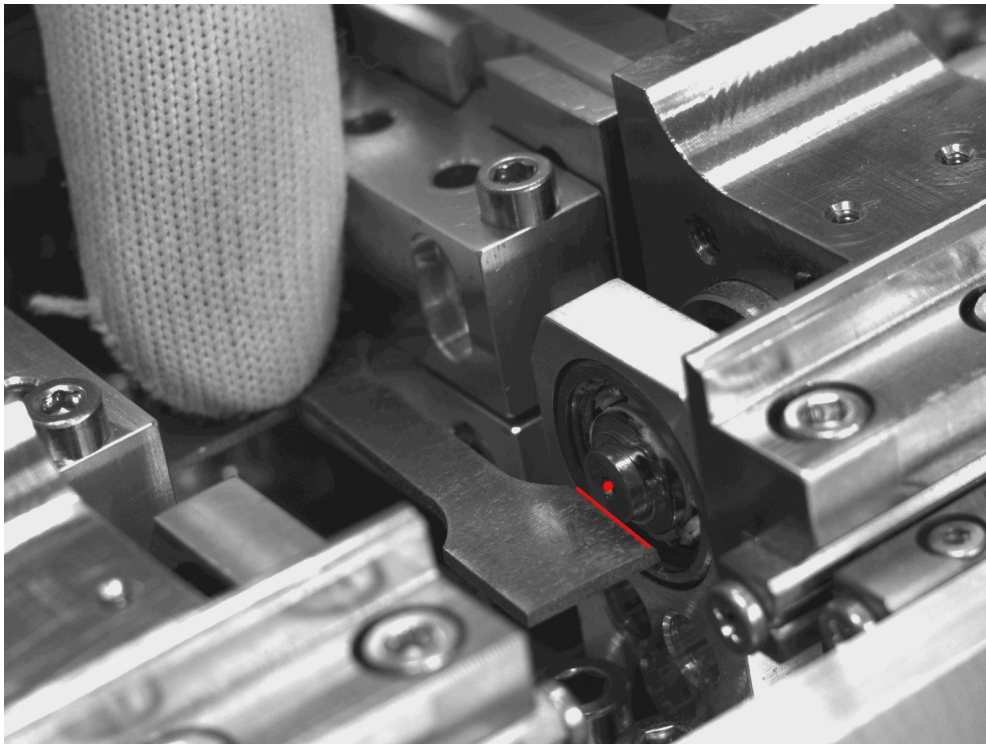


Abbildung 39: Darstellung des Mittelpunktes der Kraftachse

Bei der Überprüfung, ob eine Verbesserung der Steifigkeit und Probenspannung unter den neuen Bedingungen erreicht wurde, kam es zur Wiederholung eines Zugversuches. Die Zugkraft betrug 300 N bei einer Geschwindigkeit von 5 $\mu\text{m/s}$. Gegenübergestellt wurden drei Versuche. Bei dem ersten Versuch wurden die Spannbacken nur senkrecht miteinander verbunden. Vor dem zweiten Versuch wurde die Zugprobe wie beschrieben in die Kraftachse gefahren und die oberen Spannbacken wurden am Deckel verschraubt. Die Vorbereitungen für den dritten Versuch gingen so vonstatten, dass die linke Spannvorrichtung vom Joch entfernt wurde und die Befestigungsmutter der Kraftmessdose am Isolator nachgezogen wurde, siehe Abbildung 25. Während der letzten Versuche hatte diese sich durch das ständige Anziehen der Schrauben gelockert. Weiterhin wurde bei dieser Gelegenheit am Deckel eine Markierung angebracht, die die Position der Kraftachse markieren sollte. Bei dem dritten Versuch wurde also die Probe sehr genau eingespannt und die obere Spannbacke wurde am Deckel verschraubt.

In den Abbildungen 40, 41 und 42 sind die Bewegungsabläufe der einzelnen Bauteile

während der unterschiedlichen Versuche dargestellt. Es wurde nur die linke Spannvorrichtung betrachtet, da diese die größten Abweichungen und Probleme aufwies. Vergleicht man in Abbildung 40 den Verlauf der einzelnen Graphen so wird ersichtlich, dass die Spannbacke und die Heizung erst einige Sekunden später sich der Bewegung des Jochs anpassen. Der Grund ist, das Spiel zwischen Spannvorrichtung und Joch durch die Verbindung mit der Kraftmessdose musste überwunden werden. Weiterhin bewegt sich zu Beginn die Spannbacke augenscheinlich erst in die andere Richtung und folgt später dem Verlauf des Jochs. Das bedeutet, dass sich die linke Spannbacke aus der betrachteten Ebene hinaus bewegt hat. Die Ursache der Verkipfung der Spannbacke ist die Lage der Zugprobe zur Kraftachse. Im zweiten Versuch konnte eine Verbesserung der Steifigkeit der gesamten Spannvorrichtung erreicht werden. In Abbildung 41 lässt sich sehr schön erkennen, dass zwischen Heizung und Joch ein wesentlich kleineres Spiel vorhanden ist als zuvor. Auch der Weg der vom Joch zurückgelegt werden musste, um die 300 N aufzubringen ist von ca. 750 μm auf ca. 70 μm gesunken. Diese Verbesserung der Einspannung ist durch die Verbindung der oberen Spannbacke zur Heizung realisiert wurden. Weiterhin wurde dadurch das Spiel zwischen Spannbacke und Joch von ca. 250 μm auf ungefähr 40 μm reduziert. Aus der Bewegungskurve der Spannbacke aus Abbildung 40 lässt sich erkennen, dass diese sich vom Versuchsbeginn an in die selbe Richtung wie das Joch bewegt. Die Position der Zugprobe zur Kraftachse wurde verbessert. Wie schon beschrieben wurden im dritten Versuch weitere Maßnahmen zur Verbesserung der Spannvorrichtung getroffen. In Abbildung 42 werden die Wegverläufe der Bauteile aus dem dritten Versuch dargestellt. Trotz allen Bemühungen konnte keine wesentliche Verbesserung erreicht werden. Das Spiel zwischen Heizung und Joch hat sich im Vergleich zum zweiten Versuch wieder vergrößert. Der Ausbau der linken Spannvorrichtung und das erneute Festziehen der Mutter brachte keine Verbesserung hinsichtlich der Steifigkeit.

Für spätere Versuche kann ich sagen, dass sich diese Mutter immer wieder lösen wird. Ein erneutes Festziehen und Einbau der Spannvorrichtung wird eine neue Ausgangssituation für die nächsten Versuche bringen. Hinsichtlich der Wiederholbarkeit der Versuche in Bezug auf gleiche Messwerte der Kraftmessdose muss eine andere Variante der Befestigung der Kraftmessdose am Joch und am Isolator gefunden werden.

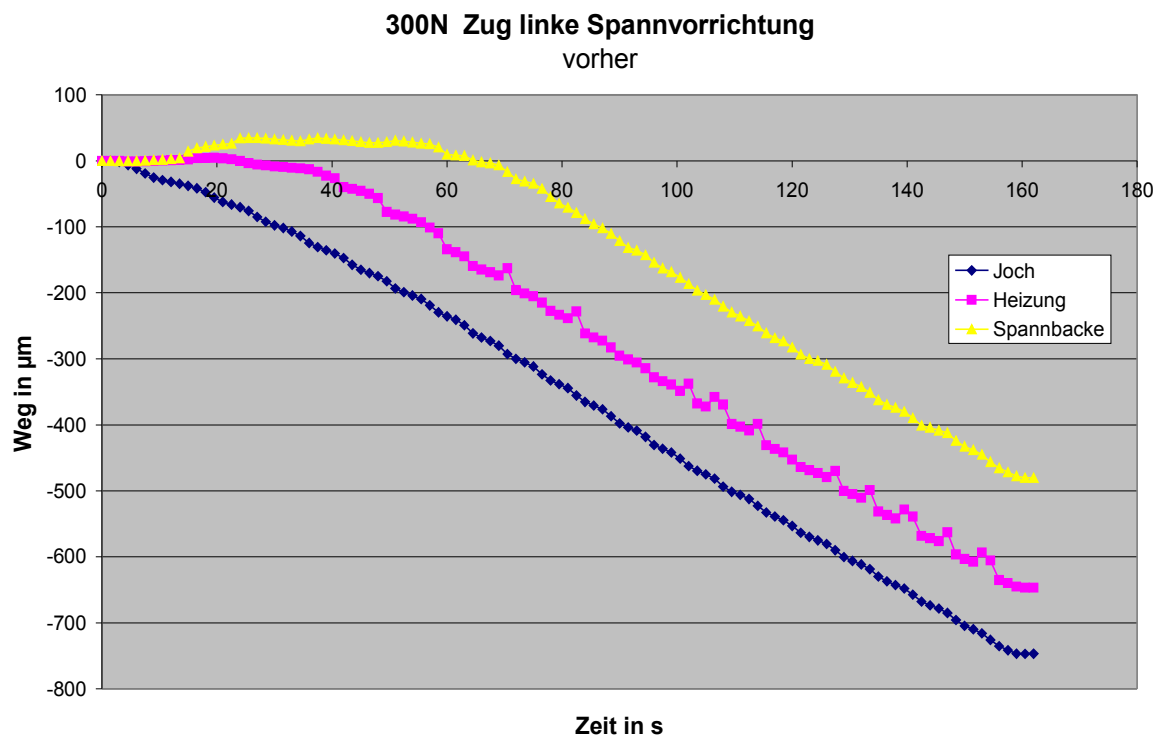


Abbildung 40: Backen nur senkrecht miteinander verbunden

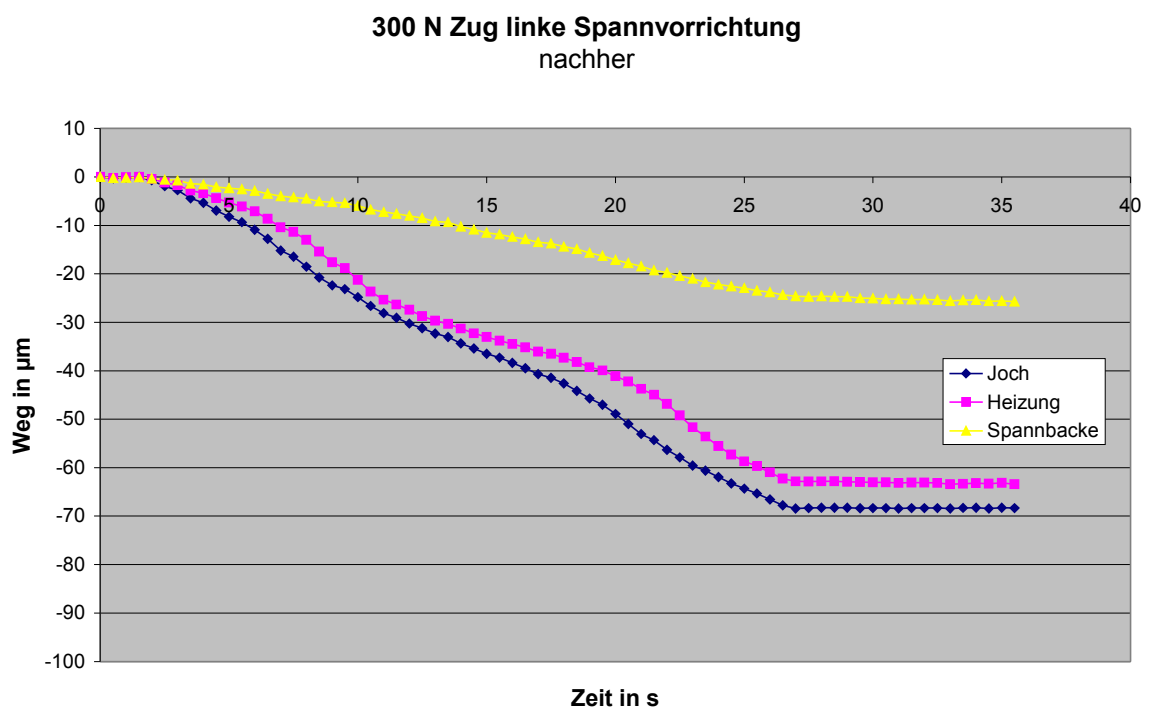


Abbildung 41: Versuch Probe in Kraftachse fahren lassen, Backen an Deckel verschraubt

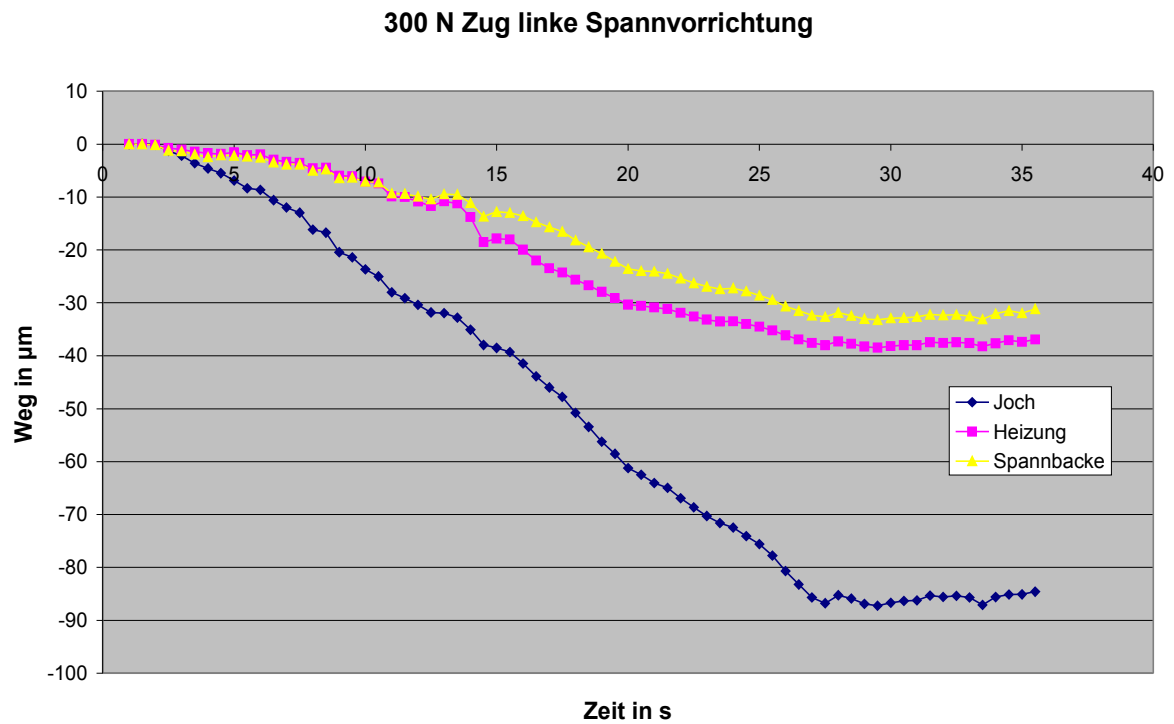


Abbildung 42: Versuch Kraftachse markiert und Probe sehr genau eingespannt, Backen mit Deckel verschraubt

Kraftabfall

Bei Versuchen unter Kraft, tritt nachdem die Kraft erreicht wurde und die Motoren stillstehen, ein Kraftabfall auf. Der Grund des Rückganges der Kraft konnte in dieser Arbeit nicht genau spezifiziert werden. Es können nur Mutmaßungen angegeben werden. Ein Grund dafür könnte die Kraftmessdose sein. Speziell der Federkörper der durch die Krafteinwirkung elastisch verformt wird kann sich bei Stillstand der Motoren wieder entspannen.

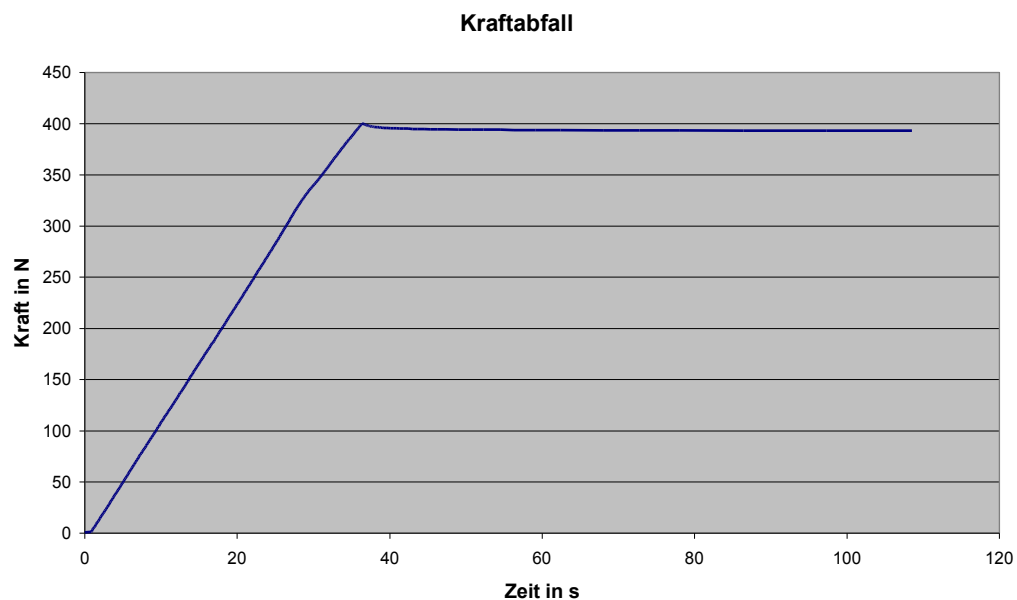


Abbildung 43: Kraftabfall

5.4 Betrachtung Weg Antriebssystem / Messsystem / VEDDAC

Unter den neuen Bedingungen, dass die Probe möglichst genau in Kraftachse liegt und das Spiel der Schwalbenschwanzführung durch das Verschrauben minimiert wurde, wurden noch einmal Versuche durchgeführt bei denen der angegebene Fahrweg durch die Steuersoftware und der Auswertung durch VEDDAC verglichen wurden.

Die Versuchsbedingungen wurden wie folgt festgelegt:

- die Versuche fanden alle mit einer eingespannten Probe statt
- betrachtet wurde die linke Spannvorrichtung
- es wurde diesmal nicht die zu erreichende Kraft eingestellt sondern der zu fahrende Weg, er betrug für jeden Motor 50 μm bzw. 100 μm
- durch die Einstellung, die Kraft auf Null zu fahren wurde der Weg wieder zurückgefahren
- die Geschwindigkeit wurde mit 5 $\mu\text{m/s}$ festgelegt.

Die Werte für die Auswertung stammen einmal aus der Steuersoftware als Daten vom Antriebssystem und vom Messsystem und einmal durch die Auswertung der Korrelation. In der Auswertung wurden das Joch, der Isolator und die Spannbacke betrachtet.

Es entstanden folgende Werte.

Tabelle 3: Übersicht der verschiedenen Wege

Versuch (Bezeichnung Versuchsablauf bedingt)	Einstellungen	Kraft in N	Weg Antriebs- system in μm	Weg Mess- system in μm	Weg VEDDAC in μm		
					Joch	Isolator	Spann- backe
3.	50 μm , 5 $\mu\text{m/s}$	119,9	100	43	32,5	17,5	12
3.rückwärts	50 μm , 5 $\mu\text{m/s}$	0	100	43	32	16	11
4.	50 μm , 5 $\mu\text{m/s}$	119,9	100	44	32,5	17,5	11,5
4. rückwärts	50 μm , 5 $\mu\text{m/s}$	0	100	44	31,5	15	10,5
2.	100 μm , 5 $\mu\text{m/s}$	214,8	200	83	62	35	25
2. rückwärts	100 μm , 5 $\mu\text{m/s}$	0	175	78	58	28,5	20
5.	100 μm , 5 $\mu\text{m/s}$	233,2	200	87	65	32,5	23,5
5. rückwärts	100 μm , 5 $\mu\text{m/s}$	0	190	86	64,5	21	22,5

Der Weg des Antriebssystems bezieht sich auf die Anzahl der Schritte der Schrittmotoren. Dieser muss noch einmal halbiert werden, da hier der gesamte Weg angegeben wurde. Die Werte vom induktiven Wegmesssystem sind in der selben Form angegeben. Das heißt, es wurden tatsächlich z.B. im 3. Versuch vom Motor 50 μm gefahren. Das Wegmesssystem hat aber nur eine relativ Bewegung von 43 μm gemessen. Da das Wegmesssystem an den Jochs angebracht ist, müssten sich beide Seiten um 22,5 μm bewegt haben. Die Frage ist nun, wieso hat sich das Joch dann um 32,5 μm bewegt. Die einzige Lösung ist, dass sich das rechte Joch nur um 10,5 μm bewegt hat und somit auch der Bolzen des Wegmesssystems. Die Abweichung der 10,5 μm von den 22,5 μm beträgt ca. 30%. Dieser Wert ergibt sich auch bei dem 2. Versuch. Das linke Joch hat sich 62 μm bewegt. Somit muss sich das Rechte um 21 μm verschoben haben um die 83 μm zu erreichen. Da bei diesen Versuchen das rechte Joch nicht betrachtet werden konnte, musste eine Wiederholung stattfinden, bei dem der Weg des rechten Joches mit aufgenommen werden muss. Zum Beispiel durch eine Wegmessuhr die außerhalb des Joches angebracht wird.

Die Werte aus der Auswertung ergeben, dass der Weg des Joches nicht dem Weg entspricht der eigentlich gefahren werden sollte. Weder den eingegebenen 50 μm noch die 43 bzw. 44 μm . (Da aber die Werte wiederholt auftreten kann man von einem systematischen Fehler sprechen, der wenn er genauer bekannt ist kompensiert werden kann.) Die prozentuale Abweichung des Weges vom Joch zum Wegmesssystem beträgt bei 50 μm und sowohl bei 100 μm im Durchschnitt 25,7%. Bei dem schon oben erwähnten Versuch bei dem eine Kraft von 300 N erreicht wurde, beträgt die Abweichung 25,8 %. Das heißt die unterschiedliche Größe der Kraft hat (scheinbar) keinen Einfluss.

Der neue Versuchsaufbau sah nun folgendermaßen aus. Zuerst wurde das linke Joch mit der CCD – Kamera betrachtet und gleichzeitig wurde eine Wegmessuhr waagerecht zum rechtem Joch angebracht. Nach zwei Versuchen wurden der Messaufbau umgedreht. Der Einsatz der Messuhr dient nur als Kontrolle des gefahrenen Weges und dient nicht zum Ermitteln eines hundertprozentig gültigen Messwertes. Zusätzlich wurden auch die Werte von der Sensorplatine der Wegsteuerung aufgenommen. Beim letzten Versuch wurde eine Aluminium Probe

eingesetzt. Es entstanden folgende Werte.

Tabelle 4: Übersicht der verschiedenen Wege mit Messuhr

Versuch	Einstel- lungen	Weg Messsystem gesamt in μm	Weg Sensor- platine gesamt in μm	Weg VEDDAC / Messuhr in μm		
				Links	Rechts	Summe
1.	50 μm / 5 $\mu\text{m/s}$	46	38,4	28	17	45
2.	50 μm / 5 $\mu\text{m/s}$	46	38,3	27,5	17	44,5
3.	50 μm / 5 $\mu\text{m/s}$	47	38,2	24	22,5	46,5
4.	50 μm / 5 $\mu\text{m/s}$	45	38,1	23	25	48
5.	50 μm / 5 $\mu\text{m/s}$	44	38	25	22	47

Die ermittelten Werte ergaben, dass die gefahrenen Wege, Summe der Bewegung des linken und rechten Jochs, auch vom Wegmesssystem wiedergegeben wurden. Auch hier wurden die geforderten 50 μm nicht erreicht. Der Grund liegt in der elastischen Verformung der Vorrichtung während eines Zugversuches, welches später noch weiter erläutert wird. Die Werte der Sensorplatine weichen vom Messsystem aus dem Grunde ab, da das Messsystem schon mit einen Korrekturfaktor korrigiert wurde. Dieser Korrekturfaktor wird durch die Aufnahme von Kennlinien noch weiter präzisiert. Auch der Versuch mit der Aluminium Probe bringt die selben Werte wie der mit der Stahl Probe. Dies liegt wahrscheinlich an den geringen Kräften bei denen gemessen wurde.

5.5 Betrachtung der Lager / Lagergehäuse

Wichtig für die genaue und spielfreie Verfahrbewegung der Spindeln sind die Lager. Diese sind um spielfrei zu laufen vorgespannt. Die Spindeln werden jeweils an der Seite des Riemenantriebes durch zwei Lager geführt. Diese befinden sich in einer Buchse und sind gegenseitig durch einen Abstandsring getrennt. Die axiale Verschiebung wird durch einen Anschlag auf beiden Seiten verhindert. Geschlossen wird die Buchse durch einen Deckel. Bei Betrachtung der Lager wurde festgestellt, dass beim linken unterem Lager der Deckel einen Spalt aufweist (Abb. 44). Unter der Bedingung von 300 N Zugkraft wurden Bildfolgen aufgenommen. Bei der Betrachtung der Bilder durch VEDDAC Animation wurde festgestellt, dass sich der Spalt nicht ändert. Werden die Bilder schneller abgespielt als normal, so erkennt man aber, dass sich das Lagergehäuse verbiegt. Die Gegenkraft, die durch den Zugversuch entsteht, zieht das Gehäuse in die Mitte der Vorrichtung. Durch weitere Untersuchungen wurde festgestellt, dass auch die anderen Lager sich so verhalten. Die maximale Auslenkung eines Lagers betrug ca. 51µm. Dieses Verhalten trägt natürlich enorm dazu bei, dass unter Last keine genauen Wege gefahren werden können.

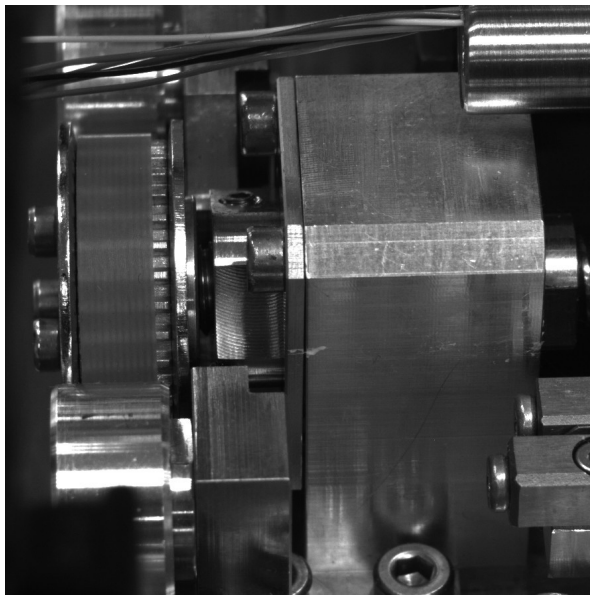


Abbildung 44: linke untere Lagerbuchse

Nach Versuchen mit einem stetigen Kraftanstieg von 50 N wurde ermittelt, dass pro 50 N Kraftanstieg sich die Lagerbuchse an der Oberseite um ca. 4,8 μm verbiegt. In Abbildung 45 ist der Weg - Zeit - Verlauf dargestellt. Die unterschiedlichen Haltezeiten der Kräfte kommen von der manuellen Eingabe der Krafterhöhung. Der Weg bei Krafterhöhung unterscheidet sich dahingehend zum Weg bei Kraftverminderung, dass dieser größer ist. Am Ende des Versuches konnte festgestellt werden, dass die Ausgangsposition der Lagerbuchse nicht wieder erreicht wurde.

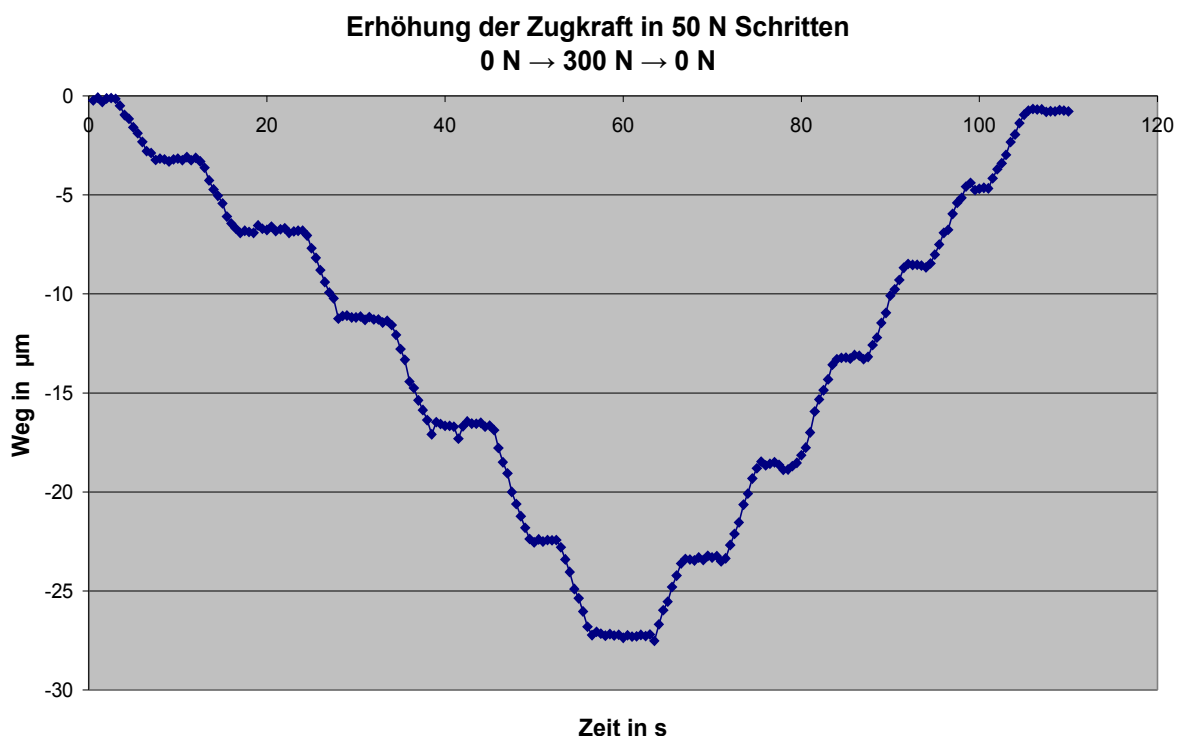


Abbildung 45: Lagerverschiebung durch stetige Krafterhöhung

Die folgenden Abbildungen zeigen die Messfelder die bei der Korrelationsauswertung genutzt wurden, um zu zeigen wie das Lagergehäuse sich verformt. Da die Lagergehäuse mit der Bodenplatte verschraubt sind, liegt die Vermutung nahe, dass durch „lockere“ Befestigungsschrauben die Lagergehäuse kippen. Wenn dies der Fall wäre, müsste sich die rechte Schraube bzw. der Teil des Lagergehäuses unter der Schraube nach oben verschieben (Abb.44). Bei der Auswertung konnte jedoch festgestellt werden, dass dies nicht der Fall ist. Somit ist diese Bewegung eine reine

Verbiegung des Lagergehäuses. Bei einem Druckversuch, siehe Abbildung 47, wird das Gehäuse, wie vermutet, in die andere Richtung verbogen.

Da sich die Verformungen der Gehäuse noch im elastischen Bereich befinden, entstehen keine Schädigungen an der Vorrichtung.

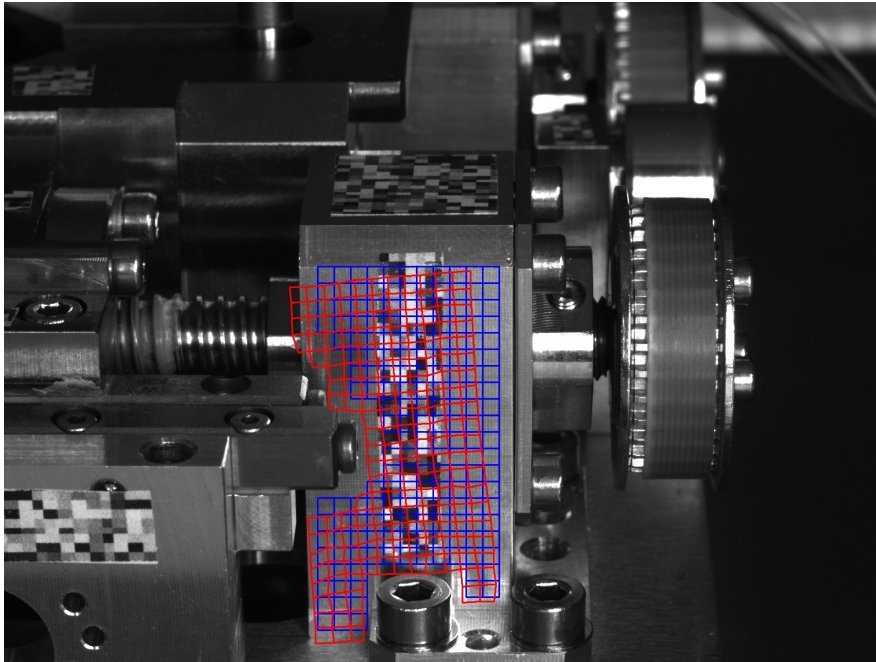


Abbildung 46: Lagerverschiebung Zugversuch

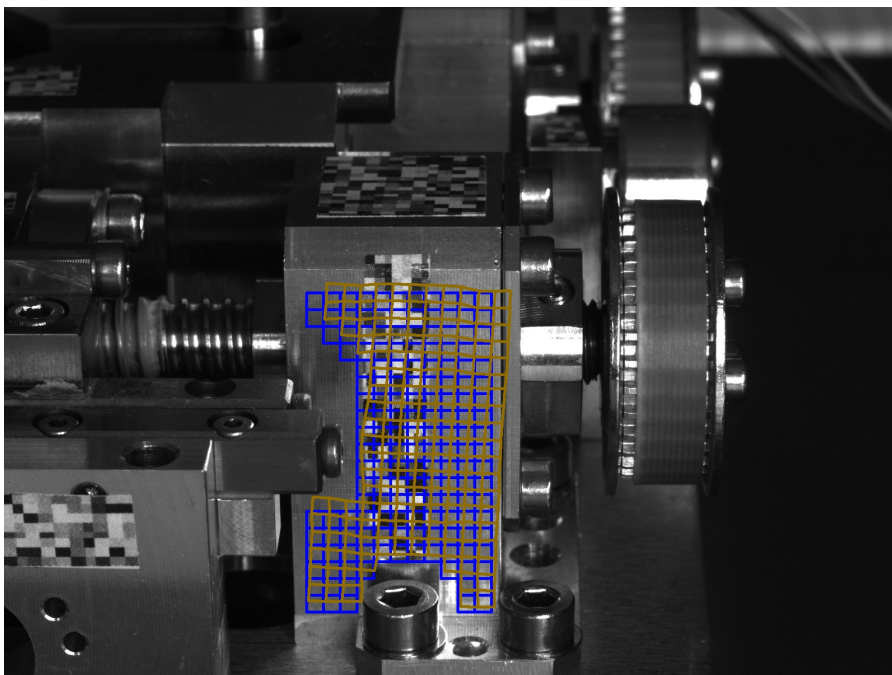


Abbildung 47: Lagerverschiebung Druckversuch

5.6 Betrachtung Rahmen / Bodenplatte

Zur weiteren Analyse der Steifigkeit der Vorrichtung wurde nun auch der Rahmen / Bodenplatte untersucht. Die Kamera wurde nun so aufgestellt, dass die Vorrichtung von der Seite betrachtet werden konnte. Liegt der betrachtete Punkt in der Mitte der langen oberen Seite so erweckt es den Anschein als wenn die gesamte Vorrichtung während eines Zugversuches sich nach unten bewegt. Da zu diesem Zeitpunkt die Vorrichtung auf einer Kunststoffplatte verschraubt war, kann es sein, dass diese nicht plan ist und während eines Versuches in Bewegung gerät. Betrachtet man die linke Seite so erkennt man, dass die Kunststoffplatte sich durchbiegt. In der Abbildung 48 lässt sich erkennen, wie sich die Bodenplatte an der Stelle des Lagergehäuses wölbt.

Zur genaueren Analyse der Durchbiegung wurde die Vorrichtung von der Bodenplatte gelöst. Zwei Metallquader die an beiden Seiten der Vorrichtung untergelegt wurden sollen nun zwei Loslager simulieren. Somit ist sichergestellt dass sich die Vorrichtung vertikal bewegen kann. Durchgeführt wurde wieder ein Versuch mit 300 N Zugkraft. Die Abbildungen 49 und 50 zeigen die Auswertung des Versuches. In Abbildung 50 ist die obere lange Seite der Vorrichtung zu sehen. Mit einer Skalierung der Messwerte um den Faktor 100 erkennt man deutlich die Durchbiegung der Bodenplatte. Bei einem Druckversuch verbiegt sich die Platte nach oben. Auch die kurze Seite wurde bei einem Zugversuch beobachtet. Hier ergibt die Korrelation eine Aufwölbung der Platte, siehe Abbildung 49. Diese Durchbiegung der Bodenplatte ist das Resultat der Verformung der Lager. Bei einem Zugversuch werden die Lager in die Vorrichtungsmitte gezogen. Dabei wird die Platte mitgezogen und verbiegt sich. Die größte Durchbiegung der Platte betrug bei 300 N Zugkraft 64 μm . Eine Lösung für dieses Problem könnte konstruktiv durch zwei durchgehende Umlaufspindeln gelöst werden. Da die Vorrichtung bei einem Einsatz wahrscheinlich auf einen Messtisch befestigt wird, wird sich diese Verformung nicht stark auf den Zugvorgang ausüben.

Daraus folgt:

Die elastische Verformung der gesamten Vorrichtung legt sich auch auf das Messsystem aus. Da dieses auf den Joch montiert ist, werden durch die elastische

Verformung Messfehler hervorgerufen. Die Wegsteuerung der Vorrichtung darf nun nicht auf den Verfahrweg der Motoren basieren, da dieser nicht mit dem tatsächlichen Weg übereinstimmt. Um eine genaue Wegsteuerung zu erhalten, müssen die Werte zur Steuerung vom linearen Wegmesssystem genommen werden. Dies ist auch der Grund das bei den Versuchen aus Kapitel 5.4 die geforderten 50 μm pro Seite vom linearen Messsystem nicht gemessen wurden.

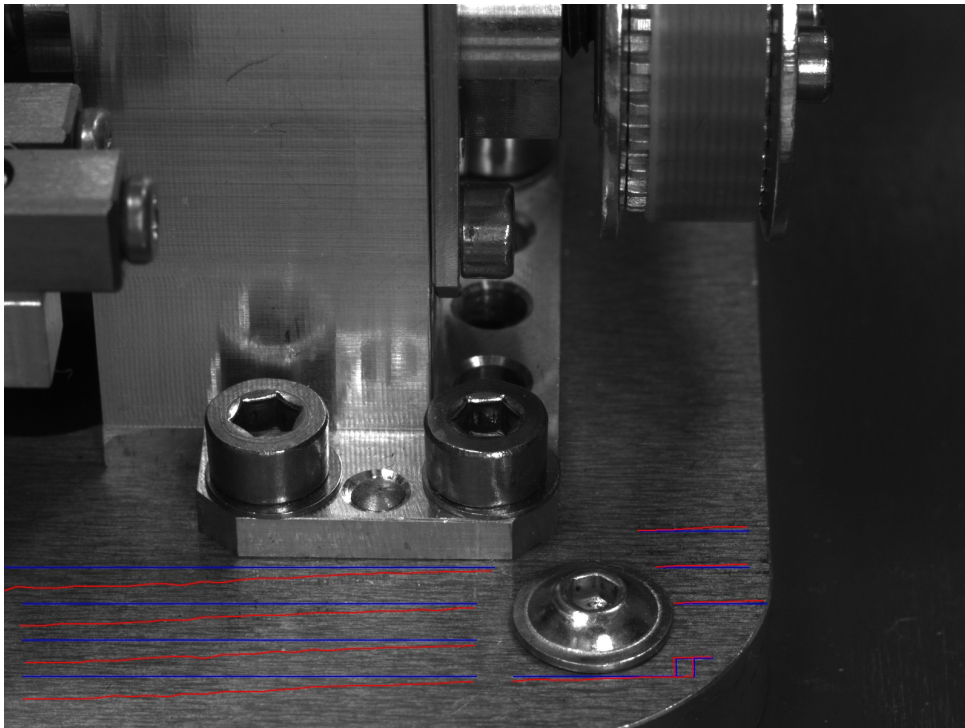


Abbildung 48: Biegung der Bodenplatte

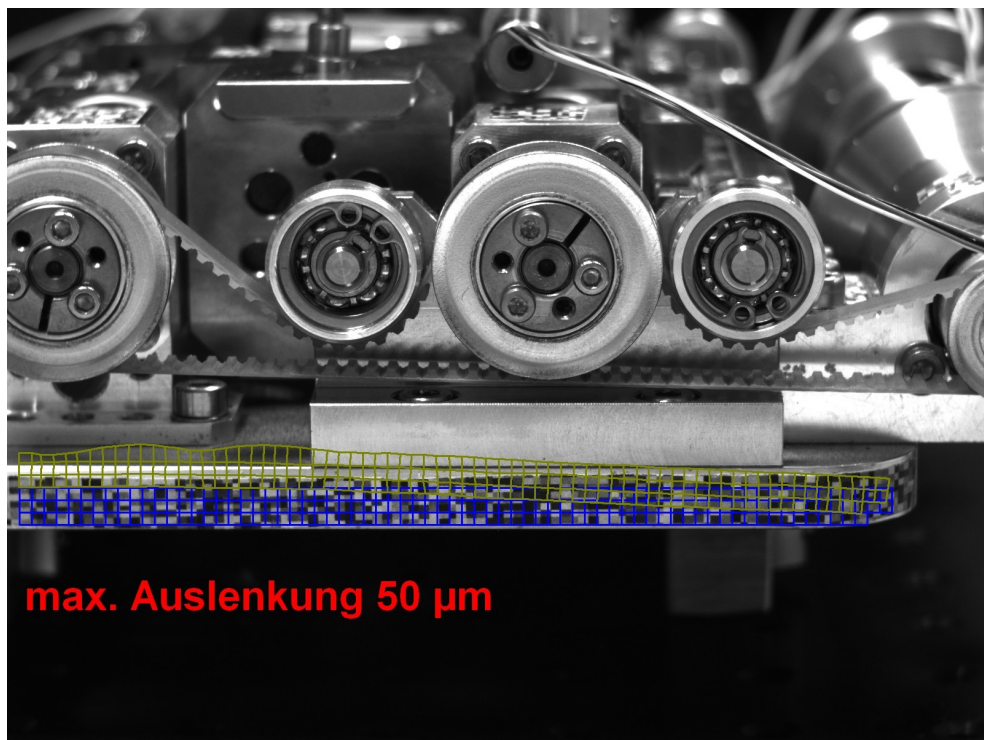


Abbildung 49: Aufwölbung der Bodenplatte während Zugversuch, kurze Seite

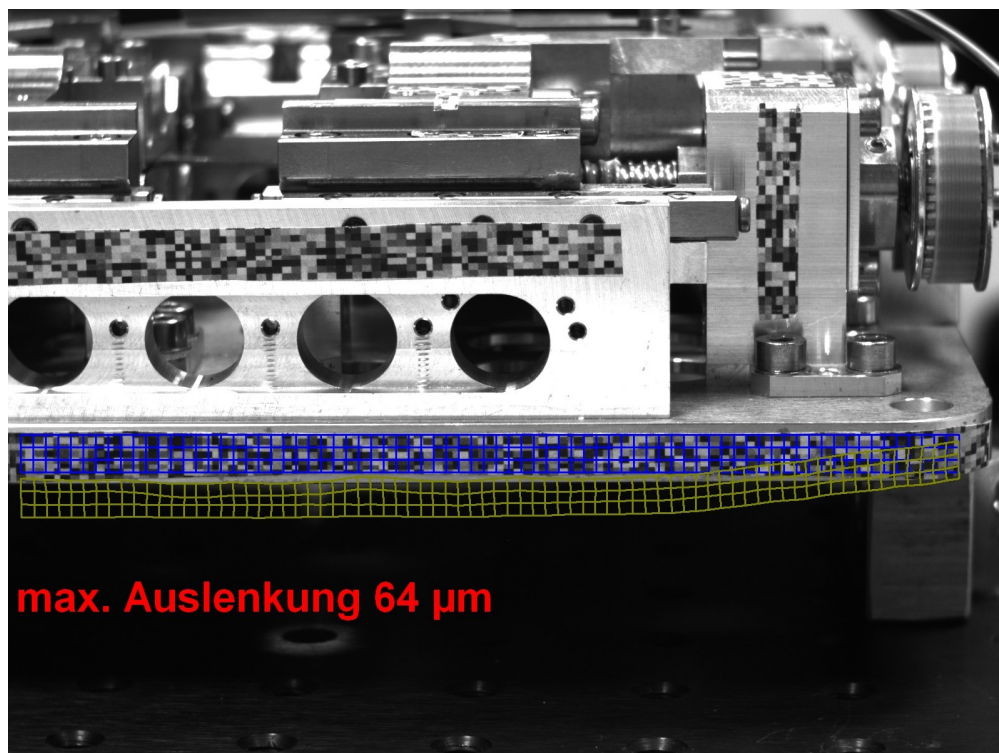


Abbildung 50: Durchbiegung der Bodenplatte während Zugversuch, lange Seite

5.7 Aufnahme Kennlinie Wegmesssystem

Die Aufnahme der Kennlinie des Wegmesssystems ist daher von großer Bedeutung da die hoch genaue Wegsteuerung der Vorrichtung sich auf eben dieses Wegmesssystem bezieht. Das induktive Messsystem arbeitet nach dem Prinzip des Linear variablen Differential Transformators. Der Aufbau besteht aus einer Primärspule, zwei Sekundärspulen und einen beweglichen Eisenkern. „Hier wird die Kopplung der Primär- und der Sekundärwicklung eines Transformators durch die Lageänderung eines Eisenkerns beeinflusst. In beiden Sekundärwicklungen wird bei Mittelstellung des Kerns jeweils die gleiche Spannung induziert, die Differenzspannung ist also null. Bei Verschiebung des Kerns werden die Spannungen unterschiedlich.“ [5]. Vom Hersteller aus werden die Messsysteme mit einer hohen Messgenauigkeit geliefert. Trotzdem muss die Kennlinie des LVDT's der jeweiligen Vorrichtung angepasst werden. Bei jeder Vorrichtung herrschen andere Bedingungen die sich auf des Messsystem auslegen.

Das Aufnehmen der Kennlinie lief so ab, dass aus der Nullstellung des Messsystems jeweils in beide Richtungen gefahren wurde. Alle einen Millimeter wurde der Wegwert und der dazugehörige Spannungswert aus der Steuersoftware entnommen. Die aufgenommenen Kennlinien sind in Abbildung 51 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass diese von der theoretischen Kennlinie abweichen.

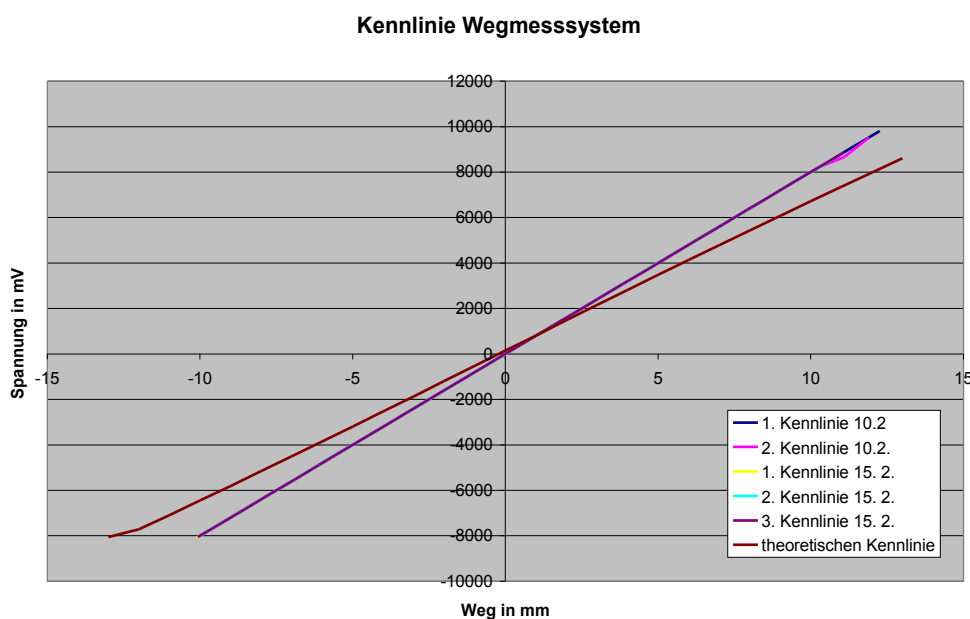


Abbildung 51: Spannung-Weg-Diagramm zur Aufnahme der Wegkennlinie

Tabelle 5: Aufgenommenen Werte der Kennlinie

Weg in mm	Spannung in mV	Wegdifferenz in mm	Spannungs-differenz in mV
-10,0745	-8059,64	0	0
-9,2885	-7430,78	0,7860	628,86
-8,5150	-6811,99	0,7735	618,79
-7,7175	-6173,97	0,7975	638,02
-6,9170	-5533,57	0,8005	640,40
-6,1088	-4887,03	0,8082	646,54
-5,2993	-4239,47	0,8095	647,56
-4,4752	-3580,18	0,8241	659,29
-3,6522	-2921,76	0,8230	658,42
-2,8207	-2256,57	0,8315	665,19
-1,9878	-1590,21	0,8329	666,36
-1,1473	-917,82	0,8405	672,39
-0,3131	-250,46	0,8342	667,36
0,5213	417,06	0,8344	667,52
1,3566	1085,25	0,8353	668,19
2,1952	1756,16	0,8386	670,91
3,0222	2417,79	0,8270	661,63
3,8476	3078,06	0,8254	660,27
4,6701	3736,12	0,8225	658,06
5,4955	4396,39	0,8254	660,27
6,3074	5045,95	0,8119	649,56
7,1154	5692,35	0,8080	646,40
7,9181	6334,50	0,8027	642,15
8,7213	6977,08	0,8032	642,58
9,5115	7609,19	0,7902	632,11
10,2973	8237,87	0,7858	628,68
11,0864	8869,10	0,7891	631,23

Unter Betrachtung der Weg- und Spannungsdifferenzen aus Tabelle 5 lässt sich eine Aussage über die Genauigkeit des Wegmesssystems treffen. Aus den vorangegangenen Messungen und aus den Auswertungen durch VEDDAC lässt sich

sagen, dass die Vorrichtung bei Bewegungen ohne Kraft die geforderten Wege einhält. Trotz dessen wurde der tatsächlich gefahrene Weg von 1 mm nicht vom Wegmesssystem gemessen. Die erreichten Spannungswerte des Messsystems ergeben nur einen Weg von 0,7735 bis 0,8405 mm.

Stellt man die prozentuale Abweichung der Messwerte vom Anfangswert dem gefahrenen Weg gegenüber so lässt sich aus der Abbildung 52 entnehmen, dass die Abweichungen des Weges mit den Abweichungen der Spannungswerte übereinstimmen. Demzufolge stimmt die Umrechnung von Spannung in Weg. Aufgrund des Messprinzips war von vornherein klar, dass das Wegmesssystem keine konstante Linearität aufweist. Der lineare Bereich der Kennlinie begrenzt sich auf die Mitte des Messbereichs. In Richtung der äußeren Endpunkte fällt die Linearität ab.

In Abbildung 52 ist die prozentuale Abweichung des Weges und der Spannung vom Basiswert Null aufgetragen. Jeweils in positiver und negativer Richtung nehmen die Abweichungen zu. Für eine exakte Wegmessung wurde die Kurve zu einer annähernden Geraden umgerechnet und die Werte in die Steuersoftware implementiert.

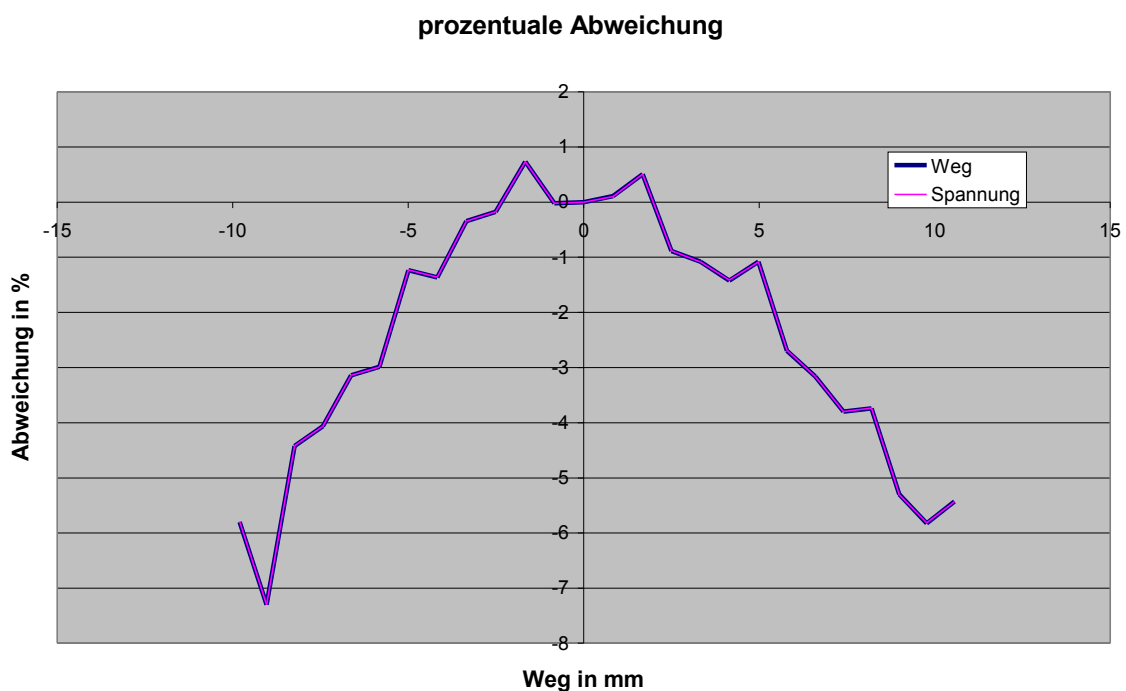


Abbildung 52: Prozentuale Abweichung der Messwerte des Wegmesssystems

5.8 Änderungsvorschläge zur Bediensoftware

Während der Arbeiten an der Vorrichtung wurden auch Probleme in der Handhabung der Steuersoftware erkannt. Zu diesem Zeitpunkt war die Steuersoftware noch in der Entwicklungsphase und kleine Änderungen konnten schnell und relativ einfach vorgenommen werden. Als Erstes war die Umstellung der Geschwindigkeitsangabe der Schrittmotoren von Schritte pro Sekunde in $\mu\text{m/s}$ von wichtigem Wert. Diese Umstellung ist für den Anwender der Vorrichtung von großem Nutzen da dies eine übliche Angabe einer Geschwindigkeit ist und somit eine einfache Handhabung ermöglicht. Desweiteren wurde geregelt das nur ein Versuch vom Bediener gestartet werden darf. Es trat einige Male auf, dass beim Starten eines Versuches der „Startknopf“ mit der Maus zweimal angeklickt wurde. Wenn dies geschah, wurde nach dem Versuchsende ein neuer Versuch von selbst gestartet. Da dies in gewissen Umständen zur Schädigung der Probe oder der Vorrichtung kommen kann, wurde eine Sperrung des „Startknopfes“ bis Versuchsende eingeführt.

Eine wichtige Funktion einer Zugvorrichtung ist nicht nur die Aufnahme von Kraft- und Weginformation sondern auch die graphische Darstellung. Im Verlauf der Arbeit wurde in der Steuersoftware ein Oszillograph bereitgestellt der während des Versuches die Kraft und den Weg der Jochs über die Zeit darstellt. (Abb. 52) Nach einem Versuch können diese Daten gespeichert werden, um sie auch später in einem Diagramm auswerten zu können.

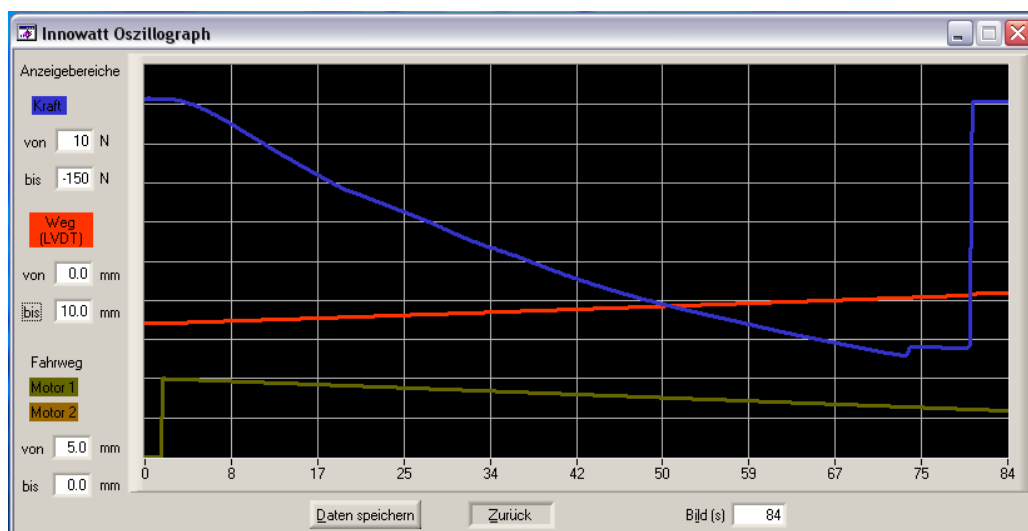


Abbildung 53: Oszillograph

6 Ergebnisse der Untersuchungen

Aus den vorangegangenen Untersuchungen können nun Vorteile und Schwachstellen der Mikrobelastrungsvorrichtung aufgezeigt werden. Ein Vorteil der Mikrobelastrungsvorrichtung ist ohne Frage die Ausführung kleinster Fahrwege und Geschwindigkeiten. Nach der Umstellung der Wegsteuerung von den Schrittmotoren auf das lineare Wegmesssystem, ist es nun möglich auch unter Last einen exakten Weg zu fahren.

Konstruktive Verbesserungen müssen bei der Spannvorrichtung vorgenommen werden. Ziel ist eine feste Probenspannung die schnell und unkompliziert ausgeführt werden kann. Weiterhin muss gewährleistet werden, dass die Spannelemente sicher am Deckel befestigt sind um die auftretende Spiele zwischen den Bauteilen so gering wie möglich zu halten.

Die Verformungen der Lager und der Bodenplatte können zu diesem Zeitpunkt durch konstruktive Veränderungen nicht vermieden werden. Eine Verbesserung in dieser Hinsicht erfordert eine Veränderung des gesamten Aufbaus der Vorrichtung. Zur weiteren Nutzung der Mikrobelastrungsvorrichtung können mit einer festen Spannung auf einen stabilen Messtisch die Verformungen der Bodenplatte auf ein Minimum verkleinert werden.

7 Vorschlag für Spannvorrichtung

Die Aufgabe der Spannelemente besteht in der flächendeckenden Spannung der Probe. Damit beide Spannbacken parallel zueinander stehen, ist eine Führung der oberen Spannbacke notwendig. Für den späteren Einsatz der Heizeinrichtung muss gewährleistet werden, dass die Wärmeleitung zwischen Heizeinrichtung, Deckel und Probe nicht gestört wird. Die Flexibilität der Spannvorrichtung verschiedene Proben zu spannen bzw. verschiedene Spannbacken zu benutzen darf nicht verloren gehen. Eine weitere Anforderung der Spannelemente ist die einfache Bedienung. Der Arbeitsbereich um die Spannelemente ist nicht sehr groß, somit ist eine unkomplizierte Spannung von großem Nutzen. Da es vorgesehen ist, dass die Vorrichtung in einem Mikroskop zum Einsatz kommt, muss darauf geachtet werden dass die Betrachtung der Probe von oben durch zusätzliche Bauteile nicht gestört wird.

7.1 Spannvorrichtung mit Führungsbolzen

Es wurde versucht, dass alle Anforderungen, die an die Spannvorrichtung gesetzt wurden, in einer neuen Version umzusetzen. Um den Aufwand zu minimieren und die Kosten gering zu halten lag das Augenmerk darauf, dass die vorhandenen Bauteile wie Heizeinrichtung ect. nicht geändert werden müssen. Abbildung 54 zeigt die neue Version der Spannvorrichtung wie sie später hergestellt werden könnte. Die Führung der oberen Spannbacke wird durch zwei um 45° zur Spannfläche geneigten Bolzen ermöglicht. Zwischen Führungsbolzen und obere Spannbacke muss eine Spielpassung vorliegen. Durch die parallele Führung der Spannbacken ist somit eine flächendeckende Spannung der Probe möglich. Die Spannung der Spannbacken übernimmt ein Bolzen auf dem ein Gewinde aufgebracht wird. Durch das Festziehen der Mutter wird die Spannkraft aufgebracht. Die untere Spannbacke ist wie die schon vorhandene am Deckel verschraubt. Die Langlöcher gewährleisten, dass bei jeder Probendicke die Zugprobe in der Kraftachse liegen kann. Die Befestigung des neuen Deckels an der Heizeinrichtung wird weiterhin mit vier Innensechskantschrauben realisiert. Die Heizeinrichtung muss nicht verändert werden. Aus thermischer Sicht könnte es bei dem Einsatz der Heizeinrichtung problematisch werden die Probe gleichmäßig zu erwärmen. Da bei eingespannter Probe zwischen oberer Spannbacke und Deckel ein Luftspalt entsteht, kann die Wärme nur über die untere

Spannbacke an die Probe geleitet werden. Um einen Wärmeverlust über die obere Spannbacke zu verhindern könnte eine isolierende Schicht zwischen Probe und oberer Spannbacke angebracht werden.

Um die neue Spannvorrichtung den Gegebenheiten der Mikrobelastrungsvorrichtung anzupassen sind einige Berechnungen notwendig.

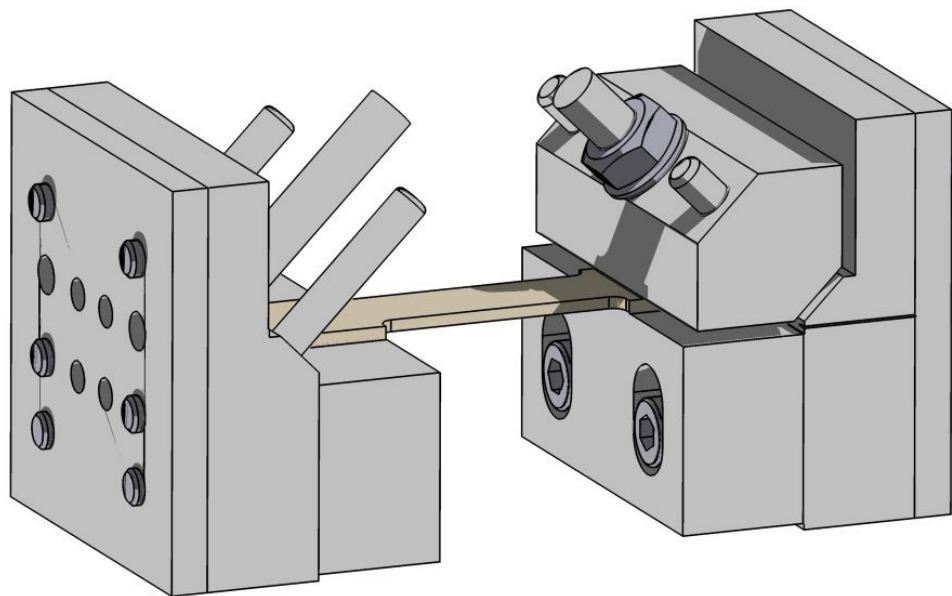


Abbildung 54: Vorschlag für Spannvorrichtung

7.1.1 Berechnung der Spannkkräfte

Als erstes werden die erforderlichen Spannkkräfte ermittelt die notwendig sind um die Probe ordnungsgemäß zu spannen.

Bei einer maximalen Zugkraft F_R von 500 N und einen Reibwert der mit $\mu = 0,1$ angenommen wird, ergibt sich laut Gleichung (7) eine senkrechte Spannkraft F_N von 5000 N.

$$F_R = F_N \cdot \mu \rightarrow F_N = \frac{F_R}{\mu} = \frac{500\text{N}}{0,1} = \underline{5000\text{N}} \quad (7)$$

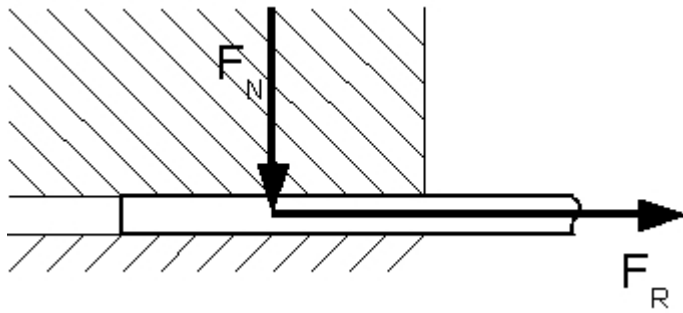


Abbildung 55: Skizze senkrechte Spannkraft

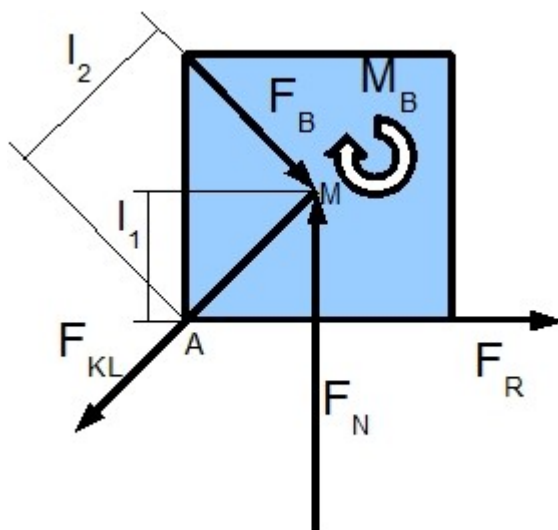


Abbildung 57: Wirkende Kräfte und Momente an der Spannbacke

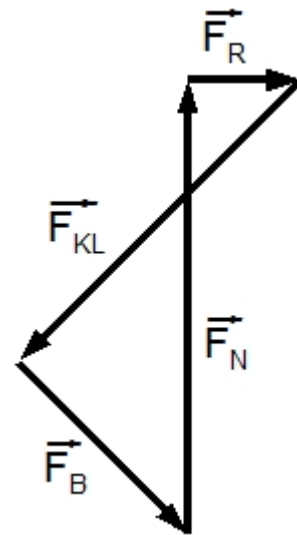


Abbildung 56: geschlossenes Krafteck

Bei der Ermittlung der erforderlichen Klemmkraft F_{KL} müssen alle an der Spannbacke angreifenden Kräfte berücksichtigt werden. Die Seitenlängen der Spannbacke werden mit 12x12 mm angenommen. Die durch die Schraube aufgebrachte Spannkraft führt zur Klemmkraft F_{KL} . Die Bolzen die die Spannbacke führen wirken auf diese mit der Kraft F_B . Aus dem Spannen der Probe resultiert die Normalkraft F_N . Durch die Betriebskraft F_R wird ein Betriebsmoment M_B auf die Spannbacke ausgeübt (Abb. 56). Laut [6] bleibt ein Bauteil in Ruhe, wenn die Summe der äußeren Kräfte oder Schnittkräfte am freigeschnittenen Bauteil gleich Null ist (Abb. 57) und die Summe der äußeren Momente sowie der statischen Momente der äußeren Kräfte

bezüglich eines Referenzpunktes verschwinden.

Aus dem Kräfte- und Momentengleichgewicht (8) können nun die gesuchte Größen ermittelt werden.

$$\Sigma M = 0; \quad \Sigma F_x = 0; \quad \Sigma F_y = 0 \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \Sigma M_M = 0: \quad 0 &= -M_B + F_R \cdot l_1 & l_1 &= 6 \text{ mm} \\ M_B &= 500 \text{ N} \cdot 6 \text{ mm} \\ M_B &= 3 \text{ Nm} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\Sigma F_x = 0: \quad 0 = F_R - \cos(45^\circ) \cdot F_B - \cos(45^\circ) \cdot F_{KL} \quad (10)$$

$$\Sigma F_y = 0: \quad 0 = F_N + \sin(45^\circ) \cdot F_B - \sin(45^\circ) \cdot F_{KL} \quad (11)$$

$$\Sigma M_A = 0: \quad 0 = -M_B + F_N \cdot l_3 + F_B \cdot l_2 \quad l_3 = l_1 \quad (12)$$

$$l_2 = \sqrt{(12 \text{ mm})^2 + (12 \text{ mm})^2} = 8,5 \text{ mm} \quad (13)$$

Nach umstellen der Formel (12) nach F_B und einsetzen der Werte aus (9) und (13) ergibt sich eine Bolzenkraft von 3176,5 N (14).

$$F_B = \frac{M_B - F_N \cdot l_1}{l_2} = \frac{3 \text{ Nm} - 500 \text{ N} \cdot 0,006 \text{ m}}{0,0085 \text{ m}} = -3176,5 \text{ N} \quad (14)$$

F_B eingesetzt in (11) und umgestellt nach F_{KL} ergibt eine Klemmkraft von 3894,5 N (15).

$$F_{KL} = \frac{F_N + \sin(45^\circ) \cdot F_B}{\sin(45^\circ)} = \frac{500 \text{ N} + \sin(45^\circ) \cdot (-3176,5 \text{ N})}{\sin(45^\circ)} = 3894,5 \text{ N} \quad (15)$$

7.1.2 Vorauslegung der Schraubenverbindung

Der für die Auslegung der Schraubenverbindung erforderliche Spannungsquerschnitt kann laut [1] mit Formel (16) bestimmt werden.

$$A_S \geq \frac{F_{Be} + F_{Kl}}{\frac{R_{p0,2}}{\kappa \cdot k_A} - \beta \cdot E \cdot \frac{f_z}{l_k}} \quad (16)$$

$F_{Be}.....$ axiale Betriebskraft der Schraube aus
Gleichung (17)

$F_{KL}.....$ geforderte Klemmkraft aus Gleichung (15)

$R_{p0,2}...$ 0,2 % - Dehngrenze des Schraubenwerkstoffes nach [2] TB. 8-4;
Festigkeitsklasse 8.8

$\kappa.....$ Reduktionsfaktor, abhängig von $\mu_G = 0,1$ ([2] TB. 8-12b) und der Schraubenart:
nach [1] Seite 209

$\beta.....$ Nachgiebigkeitsfaktor für Schaftschrauben nach [1]

$E.....$ E-Modul des Schraubenwerkstoffes Stahl

$f_z.....$ Setzbetrag, mittlere Wert nach [1] :

$l_k.....$ Klemmlänge der verspannten Teile

$$F_B = \frac{500 \text{ N}}{\cos 45^\circ} = 707,1 \text{ N} \quad (17)$$

$$A_S \geq \frac{707,1 \text{ N} + 3894,5 \text{ N}}{640 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} - 1,1 \cdot 210000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot \frac{0,011 \text{ mm}}{12 \text{ mm}}}$$

$$A_S = 2,80 \text{ mm}^2$$

Aus A_S lässt sich mit Formel (18) der dazugehörige Durchmesser errechnen.

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot A_S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2,8 \text{ mm}^2}{\pi}} \quad (18)$$

$$d = \underline{\underline{1,88 \text{ mm}}}$$

Aus dem errechneten Durchmesser von 1,88 mm kann nun die Gewindegröße bestimmt werden. Um eine Sicherheit in die Spannvorrichtung zu legen wird ein Gewinde der Größe M4 gewählt.

Laut [1] sollte in der Entwurfsphase die Flächenpressung unter der Mutter überprüft werden. Näherungsweise gilt Gleichung (19):

$$p \approx \frac{F_{KL}}{0,9 \cdot A_p} \leq p_G \quad (19)$$

A_p Fläche der Mutterauflage laut [2] TB. 8-8 für M4

p_G Grenzflächenpressung laut [2] TB. 8-10

$$p \approx \frac{3894,5 \text{ N}}{0,9 \cdot 11,4 \text{ mm}^2} = 379,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \leq 870 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Aus dem Ergebnis der Gleichung (19) geht hervor das kein Versagen der Mutter bzw. der Auflagefläche durch Flächenpressung auftritt.

7.1.3 Anziehdrehmoment

Um zu Überprüfen ob die erforderliche Spannkraft von 7071,1N durch die gegebene Mutter und Bolzen erreicht werden kann muss das Anziehdrehmoment berechnet werden. Laut [1] wird das Anziehdrehmoment wie folgt berechnet.

$$M_A = F_{VM} \cdot \left(\frac{d_2}{2} \cdot \tan(\varphi + \rho') + \mu_K \cdot \frac{d_K}{2} \right) \quad (20)$$

F_{VM} Montagevorspannkraft entspricht F_{KL}

d_2 Flankendurchmesser des Gewindes aus [2] TB. 8-1

φ Steigungswinkel, für metrisches Gewinde laut [1]

ρ' Reibungswinkel laut Gleichung (12)

μ_K Reibungszahl für die Auflagefläche nach [2] TB. 8-12c

$d_K/2$...wirksamer Reibungsdurchmesser in der Mutterauflage nach [1] laut Gleichung (13)

$$\rho' = \mu'_G = \frac{\mu_G}{\cos\left(\frac{\beta}{2}\right)} = 1,155^\circ \cdot \mu_G = 1,155^\circ \cdot 0,1 = 0,1155^\circ \quad (*) \quad (21)$$

(*) bei metrischen Gewinde mit $\beta = 60^\circ$ und μ_G nach TB. 8.12b, Roloff/Matek Maschinenelemente Tabellen

$$\frac{d_k}{2} \approx 0,65 \cdot d = 0,65 \cdot 4 \text{ mm} = 2,6 \text{ mm} \quad (22)$$

$$M_A = 3894,5 \text{ N} \cdot \left(\frac{3,545 \text{ mm}}{2} \cdot \tan(0,1155^\circ + 3,6^\circ) + 0,12 \cdot 2,6 \text{ mm} \right)$$

$$M_A = 1663,6 \text{ Nmm} = \underline{\underline{1,67 \text{ Nm}}}$$

Das errechnete Anziehdrehmoment aus Gleichung (20) von 1,67 Nm ist ohne weiteres durch ein Anziehen der Mutter durch ein Werkzeug mit Handkraft zu erreichen. Somit wird die erforderliche Spannkraft erreicht.

7.1.4 Beanspruchung der Schraube beim Anziehen

Infolge des Anziehdrehmoment M_A wird eine Montagevorspannkraft F_{VM} erzeugt. Diese bewirkt eine Montagezugspannung σ_M im Bolzen. Infolge des Gewindemoments M_G wird zusätzlich eine Torsionsspannung τ_T hervorgerufen. Mit der Gestaltänderungsenergie – Hypothese (23) kann der zweiachsige Spannungszustand auf einen gleichwertigen einachsigen Spannungszustand zurückgeführt werden. [1]

Um die Haltbarkeit der Verbindung zu gewährleisten muss Vergleichsspannung σ_{red} kleiner sein als die 90%ige Ausnutzung der Mindestdehngrenze $R_{p0,2}$ der Schraube, siehe Gleichung (24).

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_M^2 + 3 \cdot \tau_t^2} \quad (23)$$

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_M^2 + 3 \cdot \tau_t^2} \leq 0,9 \cdot R_{p0,2} \quad (24)$$

Zufuhr muss mit Gleichung (25) die Montagezugspannung ermittelt werden.

$$\sigma_M = \frac{0,9 \cdot R_{p0,2}}{\sqrt{1 + 3 \cdot \left(\frac{3}{d_0} \cdot (0,159 \cdot P + 0,577 \cdot \mu_G \cdot d_2) \right)^2}} \quad (25)$$

d_0 für Schaftschrauben den zum Spannungsquerschnitt gehörenden

Durchmesser d_s , Gleichung (17)

P Gewindesteigung nach [2] TB. 8-1

μ_G Reibungszahl im Gewinde nach [2] TB. 8-12a,b

$$d_s = \frac{d_2 + d_3}{2} = \frac{3,545 \text{ mm} + 3,141 \text{ mm}}{2} = 3,343 \text{ mm} \quad (26)$$

d_3 Kerndurchmesser nach [2] TB. 8-1

$$\sigma_M = \frac{0,9 \cdot 640 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{\sqrt{1 + 3 \cdot \left(\frac{3}{3,343 \text{ mm}} \cdot (0,159 \cdot 0,7 + 0,577 \cdot 0,12 \cdot 3,545 \text{ mm}) \right)^2}}$$

$$\sigma_M = \underline{503,7 \text{ N}}$$

Die Torsionsspannung ergibt sich aus Gleichung (27).

$$\tau_T = \frac{M_G}{W_t} \quad (27)$$

$$M_G = F_{VM} \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \tan(\varphi + \varrho') \quad (28)$$

$$M_G = 3894,5 \text{ N} \cdot \frac{3,545}{2} \cdot \tan(3,6^\circ + 0,1155^\circ)$$

$$M_G = 448,3 \text{ Nmm} = 0,45 \text{ Nm}$$

$$W_t = \frac{\pi \cdot d_0^3}{12} \quad (29)$$

$$W_t = \frac{\pi \cdot (3,343 \text{ mm})^3}{12}$$

$$W_t = 9,78 \text{ mm}^3$$

Aus den Werten des Gewindemoments, Gleichung (28), und des korrigierten Widerstandsmoments, Gleichung (29), lässt sich nun das Torsionsmoment bestimmen.

$$\tau_T = \frac{448,3 \text{ Nmm}}{9,78 \text{ mm}^3}$$

$$\tau_T = 45,8 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Werden nun Montagezugspannung und Torsionsspannung in Gleichung (23) eingesetzt ergibt sich eine Vergleichsspannung in Höhe von 509,9 N.

$$\sigma_{\text{red}} = \sqrt{(503,7 \text{ N})^2 + 3 \cdot (45,8 \text{ N})^2} \leq 0,9 \cdot 640 \text{ N}$$

$$\sigma_{\text{red}} = 509,9 \text{ N} \leq 576 \text{ N}$$

Da die Vergleichsspannung σ_{red} unter der Mindestdehngrenze $R_{p0,2}$ liegt, hält die Verbindung der Mutter mit dem Gewinde des Bolzen den Belastungen eines Zugversuches der Mikrobelastungsvorrichtung aus.

8 Zusammenfassung

Für die vorliegende Arbeit stand die Aufgabe, durch Ermittlung von Grundeigenschaften und Überprüfung der mechanischen und messtechnischen Bauteile, eine Mikrobelastungsvorrichtung zu verifizieren. Anwenderspezifische Kennwerte wie Spannbackenabstände, erreichbare Geschwindigkeiten, Auflösung der Messsysteme sowie Gleichlaufgenauigkeit und Umkehrspiel der Vorrichtung wurden ermittelt.

Durch verschiedene Versuche wurde bewiesen, dass die gestellten Anforderungen an die Mikrobelastungsvorrichtung hinsichtlich genauer Verfahrbewegung und Geschwindigkeitssteuerung erreicht wurden. Durch den Einsatz der Korrelationssoftware VEDDAC konnten die verschiedenen Wegangaben der Steuerungssoftware verglichen werden. Aus den daraus ermittelten Unterschieden wurde die Wegsteuerung der Vorrichtung von der Schrittzählung der Schrittmotoren, auf das lineare Messsystem umgestellt. Das lineare Messsystem wurde durch die Aufnahme einer Kennlinie an die Vorrichtung angepasst. Es kam zu einer Verbesserung der Wegmesswerte. Durch Überprüfung mittels Korrelation wurden Verformungen an Lagergehäusen und der Bodenplatte erkannt. Mit einer ordnungsgemäßen Befestigung auf einer stabilen Messplatte haben diese Mängel keinen erheblichen Einfluss auf das Messergebnis.

Die größten Mängel wurden an der Spannvorrichtung ermittelt. Aus Überlegungen für konstruktive Verbesserungen entstand ein Vorschlag für eine verbesserte Spannvorrichtung.

Aus den gewonnenen Kenntnissen und den Verbesserungen an Steuerungssoftware und Spannvorrichtung liegt nun eine für den Anwender gebrauchsfähige Mikrobelastungsvorrichtung vor.

Anhang

A Lösung des Gleichungssystems

$$I \quad a + b + c = 2$$

$$II \quad 4a + 2b + c = 4 \quad III - 4 \cdot I; III - 9 \cdot I$$

$$III \quad 9a + 3b + c = 3$$

$$I \quad a + b + c = 2$$

$$II \quad -2b - 3c = -4 \quad III - 3 \cdot II$$

$$III \quad -6b - 8c = -15$$

$$I \quad a + b + c = 2$$

$$II \quad -2b - 3c = -4 \quad III \text{ in } II \text{ einsetzen}$$

$$III \quad c = -3$$

$$I \quad a + b + c = 2$$

$$II \quad b = 6,5 \quad III \text{ und } II \text{ in } I \text{ einsetzen}$$

$$III \quad c = -3$$

$$I \quad a = -1,5$$

$$II \quad b = 6,5 \quad f(x) = 1,5x^2 + 6,5x - 3$$

$$III \quad c = -3$$

Literaturverzeichnis

- [1] Dieter Muhs, Herbert Wittel, Dieter Jannsch, Joachim Voßiek;
Rolof/Matek Maschinenlemente, 17. Auflage, Vieweg 2005,
ISBN 3-528-17028-X

- [2] Dieter Muhs, Herbert Wittel, Dieter Jannsch, Joachim Voßiek;
Rolof/Matek Maschinenlemente Tabellen, 17. Auflage, Vieweg 2005,
ISBN 3-528-17028-X

- [3] Ralf Döring; Abschlußbericht zum FuE-Vorhaben, Reg.-Nr.: IW060297
FuE-Einrichtung: Chemnitzer Werkstoffmechanik GmbH
Titel: Mikrobelastrungsvorrichtung für hochauflösende
Rastermikroskope, 2008

- [4] Chemnitzer Werkstoff GmbH; Digitale Bildkorrelation mit VEDDAC 5.0,
Handbuch, November 2009

- [5] Wolfgang Schmusch, Elektronische Meßtechnik, 6. Auflage, Vogel
Buchverlag 2005, ISBN 3-8343-3036-1

- [6] Will / Lämmel, Kleine Formelsammlung Technische Mechanik. 3.
Auflage, Fachbuchverlag Leipzig 2004

Erklärung

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Mittweida,

Jan Spranger